

Тогтмол гүйдлийн соронзон орны 3 хэмжээст компьютер загвар бүтээх нь

Б.Алтанхүү*, О.Лхагва

МУИС, ШУС, БУС, Физикийн Тэнхим

Ковид-19 цар тахлын үед зайны, цахим сургалтын хэрэгцээ үлэмж нэмэгдэж, нөхцөл байдалд тохирсон сургалтын шинэ хэрэглэгдэхүүн хөгжүүлэх хэрэгцээ шаардлага эрс нэмэгдсэн. Энэ өгүүлэлд бид, сургалтын зорилгоор тогтмол гүйдлийн соронзон орны 3 хэмжээст (3D) компьютер загварыг бүтээх үйл явц, бүтээсэн загварыг физикийн сургалтын хэрэглэгдэхүүн болгон ашиглах боломжийн талаар дурдав. Тогтмол гүйдлийн соронзон орныг тооцоолохдоо, ерөнхий тохиолдолд аналитик шийдгүй Био-Саварын хуулийн интеграл томъёог тоон аргаар ойролцоолж бодуулдаг. Бид тооцоог геометрийн тэгш хэмтэй шулуун, тойрог хэлбэрийн дамжуулагчийн гүйдэл тус бүрийн хувьд хийж соронзон орны 3 хэмжээст дүрслэл (хүчний шугам) үйлдсэн. Түүнчлэн, хавтгай дээрх дурын хэлбэртэй дамжуулагчийн гүйдлийн соронзон орныг тооцоолж 3 хэмжээст дүрслэл үйлдэх програм боловсруулав. Тооцоог Python хэл дээр, 3D график дүрслэлийг OpenGL/WebGL технологи, слайн-функц ашиглан хийв. Тооцоо, загварчлал үйлдэхэд ашигласан процессор: Intel i7 Quad Core, 2.3 GHz, 16 Gb RAM.

Түлхүүр үгс: сургалтын технологи, сургалтын хэрэглэгдэхүүн, физикийн сургалт, компьютерын загварчлал, байгалийн ухаан, мэдээллийн технологи, тооцоот туршилт

УДИРТГАЛ

Компьютер загварчлал (симуляци) бол, өгөгдсөн систем эсвэл юмс үзэгдлийн математик загварыг програмын аргаар компьютер дээр байгуулж, тухайн загвартайгаа ажиллах байдлаар эх системийн төлөв байдал, дүр төрхийг судлах үйл ажиллагаа юм [1]. Тухайн тохиолдол нь физикийн загварчлал бөгөөд, “физикийн систем, үзэгдэл, процессын компьютер загвар бүтээх” хэмээн тодорхойлж болно. Шинжлэх ухааны судалгаанд физикийн компьютер загварчлал нь нэг талаас шинжилгээний “багаж”-ийн үүрэг гүйцэтгэж, нөгөө талаас салбар дундын (математик, компьютерын ухаан, мэдээллийн технологи, компьютер график) судалгааны объект - судлагдахуун болж байдаг. Харин боловсролын салбарт компьютер загварчлалыг сургалтын зорилгоор хэрэглэнэ. Энэ тохиолдолд загварчлал нь сургалтын хэрэглэгдэхүүн бүтээх үйл ажиллагаа бөгөөд тооцоолол, дүрслэлийн тодорхой асуудлуудыг шат дараалан шийдэж байж, үр дүнг гаргаж авна. Ийм сургалтын хэрэглэгдэхүүний үлгэр жишээ болгож, Колорадогийн Булдерын Их Сургуулийн хөгжүүлсэн PhET интерактив загварчлалын төслийг дурдаж болно [2]. Төслийн хүрээнд физик, хими, биологи, математик болон бусад шинжлэх ухааны чиглэлийн 806 сая орчим

симуляци, загвар програмуудыг сургалтын зориулалтаар бүтээсэн нь өнөөдөр дэлхий даяар боловсролын орчинд ашиглагдаж байгаа. Түүнчлэн, Python болон Javascript хэлэнд суурилсан, 3 хэмжээст симуляци дүрслэл үйлдэх зориулалттай VPython/Glowscript загварчлалын хэлүүд хөгжиж [3], тэдгээрт түшиглэсэн дунд болон дээд сургуулийн түвшний ерөнхий физикийн курс хичээлүүд тавигддаг болжээ [4] (боловсролын цахим технологийн хөгжлийн дээд үзүүр нь эдүгээ virtual reality (VR), augmented reality (AR) түвшинд хүрсэн гэдгийг тэмдэглэх хэрэгтэй [5]). Манай орны хувьд, гадны ийм дэвшилтэт сургалтын технологиос авч хэрэглэхийн сацуу, эх хэл дээрх ижил төрлийн материалыг өөрсдийн боломжоор үүсгэн хөгжүүлж, бүрдүүлж, баяжуулж байх нь зүйтэй болов уу.

ТОГТМОЛ ГҮЙДЛИЙН СОРОНЗОН ОРОН

Тогтвортой цахилгаан цэнэг нь статик цахилгаан орон үүсгэдгийн адилаар тогтмол гүйдэл нь статик соронзон орон үүсгэдэг. Энэ соронзон оронг загварчлах нь физикийн компьютер загварчлалын классик бодлогуудын нэг юм [7, 8]. Ийм загвар (сургалтын хэрэглэгдэхүүн) нь шулуун, цагираг болон ороомог дамжуулагчийн гүйдлийн үүсгэх соронзон орны шинж чанартай танилцах боломжийг олгоно.

* Electronic address: altankhuu@num.edu.mn

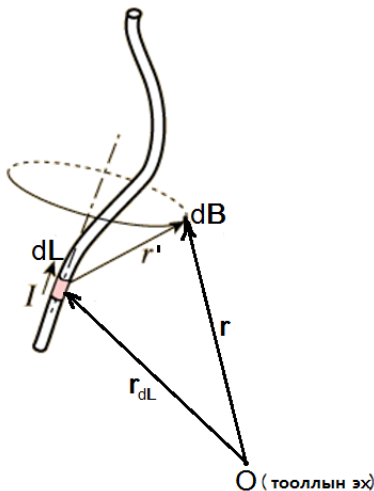
Дурын хэлбэртэй дамжуулагчийн гүйдлийн соронзон орныг Био-Саварын хуулиар тодорхойлдог [6]. Энэ хуулийн интеграл хэлбэр:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_L \frac{I d\vec{L} \times \vec{r}'}{|\vec{r}'|^3} \quad (1)$$

Энд, \vec{B} - соронзон орны индукцийн вектор, \vec{r} - орныг тодорхойлж буй цэгийн радиус вектор, $d\vec{L}$ - гүйдлийн (дамжуулагчийн) элемент-вектор, $\vec{r}' = \vec{r} - \vec{r}_{dL}$ - гүйдлийн элементээс орныг тодорхойлж буй цэг хүртэлх шилжилтийн вектор, I – дамжуулагчийн гүйдэл (ампераар), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл·м/А - соронзон тогтмол (зураг 1).

Дифференциал хэлбэр нь:

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \vec{r}'}{4\pi |\vec{r}'|^3} \quad (2)$$



Зураг 1. Гүйдэлтэй дамжуулагчийн хэсэг.

(1) интеграл нь тооллын эхээс \vec{r} зайд байрлах ямар ч цэг дээрх нийлбэр соронзон оронг олоход хэрэглэгдэх боломжтой. Ерөнхий тохиолдолд уг интегралыг аналитик бодох боломжгүй учир дифференциал элементүүдийг хангалттай бага төгсгөлөг ялгаврын элементүүдээр сольж ($dL \rightarrow \Delta L$, $dB \rightarrow \Delta B$, $\int \rightarrow \sum$), тоон аргаар ойролцоолж бодно [7,8,9].

(1) томъёонд буй $d\vec{L} \times \vec{r}'$ вектор үржвэрийг олохын тулд дамжуулагчийн $d\vec{L}$ элемент бүрийн радиус вектор \vec{r}_{dL} -ийг тодорхойлох хэрэгтэй. Практикт (сурах бичгийн хүрээнд), тооцоог хялбарчлах үүднээс дамжуулагчийн хэлбэр дүрсийг шулуун, тойрог ба ороомог гэх мэт геометрийн тэгш хэмтэй тохиолдлуудад авч үзэх нь түгээмэл байдаг.

ЗАГВАРЧЛАХ АЛХМУУД БА ШИЙДЛҮҮД

Үндсэн тооцооноос гадна технологийн чанартай дараах асуудлуудыг шийдвэрлэх шаардлагатай болдог:

А. Объектуудыг (гүйдлийн элемент, хэлхээний элементүүд, батарей гэх мэт) дүрслэх.

Б. Дамжуулагч утас зурах.

В. Параллель дамжуулагчуудын харилцан үйлчлэлийг (таталцал/түлхэлцэл) тооцоолж дүрслэх.

Г. Хүчний шугам зурах (соронзон орны дүрслэл).

А. Объектуудыг дүрслэх

Энд бид дээд түвшний Python програмчлалын хэл, түүн дээр суурилсан Visual Python (VPython) 3D график модулийг [3] ашигласан. Ингэснээр, OpenGL/WebGL API функцуудыг гараар дуудах, график контекстийн тохиргоо хийж бэлдэх; 3 хэмжээст огторгуйд нэгэн төрлийн координатууд дээр хийх геометр хувиргалтууд, эргүүлэлтийн болон проекцын матрицуудтай тулж ажиллах, компьютер графикийн бусад стандарт алгоритмуудыг биечлэн дуудах гэх мэт нүсэр хөдөлмөрөөс ангижирч, график дүрслэлийг хялбар хурдан үйлдэх боломжтой болсон.

Python хэл өөрөө cross-platform учир загвар програм маань Windows, Mac, Unix/Linux үйлдлийн системд ч ажиллах боломжтой.

Б. Дамжуулагч утсыг дүрслэх

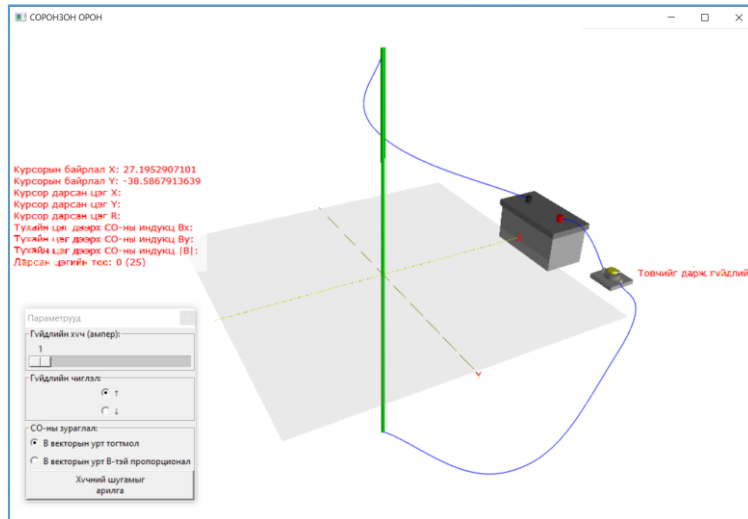
Загвар програмыг сургалтын хэрэглэгдэхүүн болгож ашиглахын тулд үндсэн физик параметруудын тооцоог үнэн зөв хийхээс гадна график дүрслэлийн хувьд бодит байдалтай ойр харагдах нь чухал. Хэрэв лабораторийн хичээлд виртуал хэлбэрээр ашиглах бол, загвар систем маань гүйцэд угсарсан цахилгаан хэлхээ байдалтай оюутанд харагдаж байх ёстой (хэлхээнд залгаагүй дамжуулагчаар гүйдэл гүйхгүй шүү дээ!). Үүний тулд жишээ нь батарей, түлхүүр, шулуун дамжуулагчийг өөр хооронд нь холбож буй цахилгаан утсыг утас шиг л харагдуулах ёстой. Зураг 2-т, нэг шулуун дамжуулагч бүхий хялбар хэлхээг хэрхэн загварчилж дүрсэлснийг харуулав. Энд цахилгаан утсыг бид куб-сплайн интерполяцын аргаар дүрсэлсэн [11]:

$$P(u) = p_{k-1}CAR_0(u) + p_kCAR_1(u) + p_{k+1}CAR_2(u) + p_{k+2}CAR_3(u) \quad (3)$$

гэсэн олон гишүүнт функцийг $\{p_{k-1}, p_k, p_{k+1}, p_{k+2}\}$ хяналтын (залгаас) цэгүүдээр тохируулж, $CAR_k(u) =$

$$\begin{cases} -su^3 + 2su^2 - su, k = 0 \\ (2 - s)u^3 + (s - 3)u^2 + 1, k = 1 \\ (s - 2)u^3 + (3 - 2s)u^2 + su, k = 2 \\ su^3 - su^2, k = 3 \end{cases} \quad (4)$$

гэсэн холбогч функцуудээр интерполяци хийж болно. Энд $s = 0.5 - 0.5t$, $t = -0.5$ – муруйн параметр.



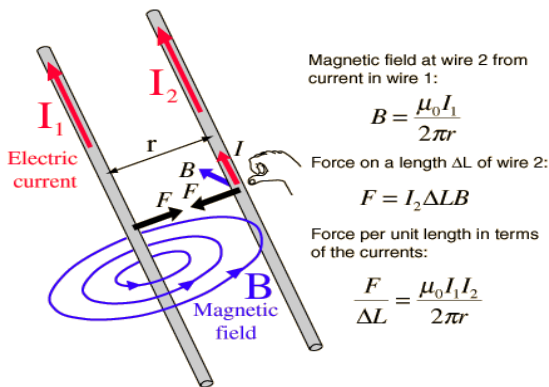
Зураг 2. Нэг шулуун дамжуулагчийн гүйдлийн соронзон орны загвар програм.

В. Соронзон харилцан үйлчлэлийг загварчлах

Хоёр параллель дамжуулагчаар гүйдэл гүйхэд хоорондоо соронзон харилцан үйлчлэлд ордог (зураг 3). Гүйдлүүд харилцан эсрэг эсвэл нэг зүгт чиглэсэн эсэхээс шалтгаалан дамжуулагчууд таталцана эсвэл түлхэлцэнэ. Энэ харилцан үйлчлэлийн хүч нь дамжуулагчийн уртын дагуу жигд үйлчлэлтэй байна, ө.х. нэгж уртад үйлчлэх хүч тогтмол байна [6, 12].

таталцаж/түлхэлцэж харагдах ёстой. Таталцаж буй дамжуулагчууд дотогш махийх ёстой. Түлхэлцэж буй дамжуулагчууд гадагш махийх ёстой. Үүнийг хэрхэн шийдэх вэ?

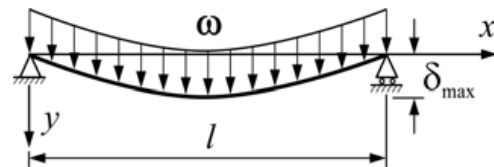
Цэвэр дүрслэлийн асуудал учраас, нэгж уртдаа жигд ачаалал авч буй, хоёр үзүүрээсээ бэхлэгдсэн урт саваа гэж төсөөлбөл, бид механик инженерчлэлийн бодлого (савааны махийлтын) бодох хэрэгтэй болно. Бодлогын нөхцөлийг зураг 4-т үзүүлэв.



HyperPhysics ©C.R. Nave, 2012

Зураг 3. Гүйдэлтэй параллель дамжуулагчуудын соронзон харилцан үйлчлэл.

Загварчлал “бодит” байхын тулд компьютер загвар дээрх дамжуулагчууд мөн



Зураг 4. Хоёр үзүүртээ бэхлэгдсэн савааны махийлт.

Аль нэг үзүүрээс х зайд орших цэг дээрх хазайлт δ_x -ийг дараах (5) томъёогоор олно [13]:

$$\delta_x = \frac{wx}{24EI} (L^3 - 2Lx^2 + x^3) \quad (5)$$

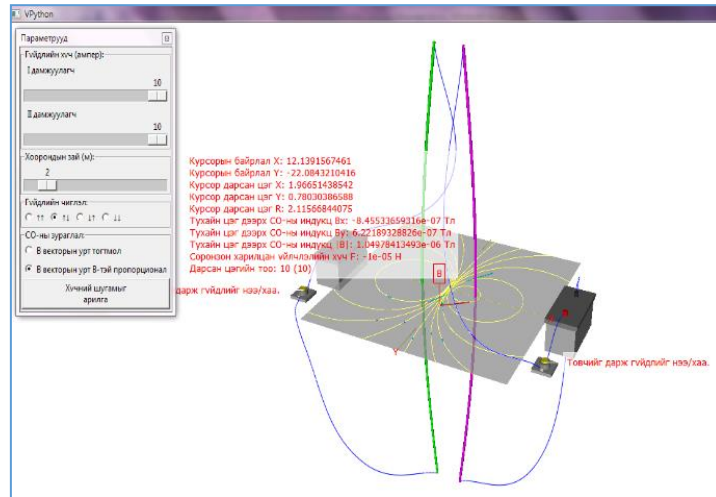
Энд $w = \frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$ – нэгж уртад үйлчлэх соронзон хүч, E - уян харимхайн модуль (зэсийнх 117 Гпа), I – талбайн инерцийн момент ($I = \frac{\pi \cdot radius^4}{4}$).

Зураг 5-д, хоёр шулуун дамжуулагчаар харилцан эсрэг чиглэлд гүйдэл гүйхэд соронзон харилцан үйлчлэлийн улмаас дамжуулагчууд хэрхэн түлхэлцэж буйг харуулав.

Г. Соронзон орны хүчний шугамыг дүрслэх
Соронзон орон бол вектор орон. Вектор орны хүчний шугамыг 3D огторгуйд байгуулахдаа, шугамын цэг бүр дээрх соронзон орны \vec{B}

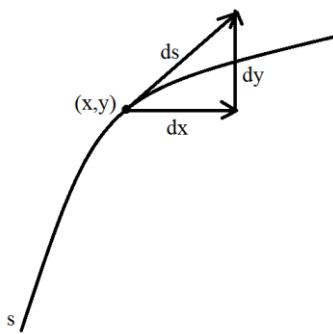
векторын чиглэлийг илэрхийлсэн 1-р эрэмбийн 3 дифференциал тэгшитгэлийг бодуулдаг [8, 9]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = \frac{B_x}{B} \\ \frac{dy}{ds} = \frac{B_y}{B} \\ \frac{dz}{ds} = \frac{B_z}{B} \end{cases}$$



Зураг 5. Параллель шулуун дамжуулагчуудын гүйдлийн соронзон орны харилцан үйлчлэлийг загварчилж байгаа нь.

Энд (x, y, z) – бодолт хийх цэг, ds – хүчний шугамын дагуу явах дифференциал алхам (бодох алхам), B_x, B_y, B_z – тухайн цэг дээрх соронзон орны векторын байгуулагчууд, B – соронзон орны векторын модуль (зураг 6).



Зураг 6. Тухайн цэг дээрх \vec{B} -ийн чиглэл нь $d\vec{s}$ -ийн чиглэлтэй давхцана.

Бид тогтмол алхамт 4-р эрэмбийн Рунге-Куттын аргыг сонгож бодолтыг гүйцэтгэсэн [10].

Хэдийгээр тооцоог компьютер дээр өрнүүлж буй боловч олон цэг дээр бодолт хийхэд үйлдэл ихтэй, хугацаа их зарцуулах учир бодолтын алхмын тоог цөөлөх хэрэгтэй. Үүний тулд:

1. Соронзон орны хүчний шугам битүү байдаг гэдгээс, шугамын эхлэл цэгээс хоёр тийш эсрэг чиглэлд бодолтыг хийнэ. Зурах мужаас (эсвэл дэлгэцийн харах мужаас) гарч явсан

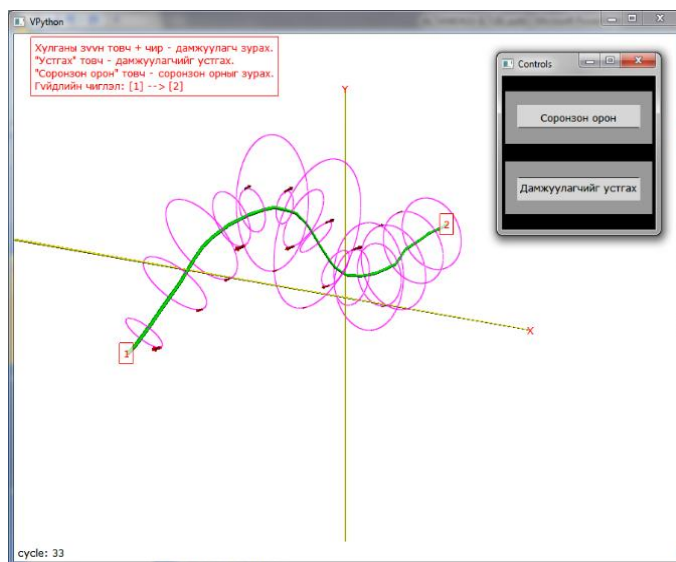
шугамыг бодохоо болино. Хоёр талаас ирж буй нэг шугамын хоёр үзүүр заасан нарийвчлал дотор орж ирмэгц, шугам битүүрсэн гэж үзээд бодолтыг зогсооно.

2. Соронзон орон аль нэг координатын (жишээ нь XY-) хавтгайтай харьцангуй тэгш хэмтэй гэвэл, тооцоог тухайн хавтгайн нэг талд бодоод нөгөө тал руу шууд бодолтгүйгээр буулгана (толин ойлт хийнэ).

Бодолт хийгдэж эхлэх цэгийг хэрэглэгч өөрөө хулганаар сонгож дарна эсвэл програм дотор урьдчилан бэлдсэн координатууд зааж өгнө. Өмнөх зураг 5-д параллель шулуун дамжуулагчуудын гүйдлийн нийлбэр соронзон орны хүчний шугамыг програм хэрхэн дүрсэлж буйг үзүүлсэн байгаа.

ДУРЫН ХЭЛБЭРТЭЙ ДАМЖУУЛАГЧИЙН ГҮЙДЛИЙН СОРОНЗОН ОРОН

Түүнчлэн бид ажлынхаа хүрээнд, хавтгай дээрх дурын хэлбэртэй дамжуулагчийн хувьд гүйдлийн соронзон орныг тооцоолж 3D дүрслэл үйлдэх програм боловсруулсан (зураг 7). Тооцоог компьютерын хүчин чадалд “дулдуйдан” гүйцэтгэж, Био-Саварын хуулийг шууд интегралчилж байгаа.



Зураг 7. Хавтгай дээрх дурын хэлбэртэй дамжуулагчийн хэсгийн үүсгэх соронзон орны дүрслэл.

Интерфейсийн хувьд, хэрэглэгч өөрөө хулганын тусламжтайгаар цэг сонгож, хүчний шугамын дүрслэлийг эхлүүлнэ. Зөвхөн шулуун, тойрог гэхгүй дурын тахир, гурвалжин, дөрвөлжин, спираль гэх мэт хэлбэртэй дамжуулагчаар гүйх гүйдлийн соронзон орныг дүрслэх боломжтой.

СУРГАЛТЫН ХЭРЭГЛЭГДЭХҮҮН

Бэлэн болсон 3D загвар програмуудтай, лекцийн хичээл дээр үзүүлэн-демонстраци, семинарын хичээл дээр дасгал, лабораторийн хичээл дээр бол виртуал туршилт байдлаар ажиллаж:

- Статик соронзон орон, түүнийг үүсгэж буй гүйдэл хоорондын хамаарал, уялдаа холбоог судлах (тоон утга ба чиглэл);
- Зэрэгцэн орших гүйдэлтэй дамжуулагч хоорондын соронзон харилцан үйлчлэлийг судлах;
- Соронзон тогтмолыг (μ_0) туршлагаар тодорхойлж гаргаж ирэх;
- Янз бүрийн геометр хэлбэртэй дамжуулагчийн гүйдлийн соронзон орны бүтэцтэй танилцах;
- Соронзон орны дүрслэл, хүчний шугамын талаар ойлголт авах

гэх мэт болон бусад дасгал, даалгавруудыг гүйцэтгэх боломжтой.

Нөгөө талаас, компьютер загвар бүтээх процесс нь өөрөө тооцон бодох физик, тооцон бодох математик, физик загварчлал, програмчлал гэх мэт хичээлийг өрнүүлэх, сургалтын агуулгыг баяжуулах шинэлэг арга хэлбэр байх болов уу.

ДҮГНЭЛТ

Физикийн сургалтад компьютер загварчлал ашиглах нь мэдээллийн технологийн ололтыг сургалтад хэрэглэж буй дэвшилтэт нэгэн хэлбэр. Тогтмол гүйдлийн соронзон орны компьютер загвар бүтээх ажил нь өөрөө физик, мэдээллийн технологи, математик гэх мэт олон салбарын асуудлыг явцын дунд шийдвэрлэн байж зорилгодоо хүрдэг олон үе шаттай, эрэл хайгуул ихтэй цогц ажиллагаа байна.

Загварчлалын технологи ашиглан бүтээсэн сургалтын хэрэглэгдэхүүн нь:

- Сургалтын эвристик арга зүйг (туршиж үйлдэнгээ өөрөө өөрийгөө сургах) хэрэгжүүлэх;
- Материаллаг бааз хомс орчинд сургалтыг хямд төсрөөр явуулах;
- Зайны болон онлайн сургалт явуулах зэрэг давуу тал, шинэлэг нөхцөл байдлыг бий болгоно гэж үзэж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Computer Simulations in Science, <http://plato.stanford.edu/entries/simulations-science/>
- [2] Interactive Simulations for Science and Math, <https://phet.colorado.edu/>
- [3] GlowScript VPython and VPython 7, <https://glowsript.org/docs/VPythonDocs/index.html>
- [4] Matter and Interactions, 4th Ed., <https://matterandinteractions.org/>

- [5] Bringing virtual and augmented reality to the classroom,
<https://edu.google.com/products/vr-ar/>
- [6] D.Halliday, R.Resnick, J.Walker, Fundamentals of Physics, 11th Ed., Wiley, 2018.
- [7] Х.Гулд, Я.Тобочник, Компьютерное моделирование в физике, т. 1, М., 1990.
- [8] Nicholas J. Giordano, Computational Physics. Prentice Hall, 1997.
- [9] L.Kirkup, Magnetic field line simulation using a microcomputer, Phys. Educ. 21, 1986.
- [10] William H. Press, Brian Flannery, Numerical Recipes. Cambridge Univ. Press, 1986.
- [11] D.Hearn, M.P.Beker, Computer Graphics: C Version, 2nd Ed., Pearson, 1997.
- [12] Biot-Savart Law, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/biosav.html>
- [13] Engineering ToolBox, (2009). Beams - Supported at Both Ends - Continuous and Point Loads. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/beam-stress-deflection-d_1312.html.