Qabul qilindi: 24-sentabr 2026-yil • Ma’qullandi: 28-sentabr 2026-yil • Nashr qilindi: 3-oktyabr 2026-yil

RAQAMLI EGIZAKLAR TEXNOLOGIYASI ASOSIDA BO‘LAJAK MUHANDISLARNING MODELLASHTIRISH KOMPETENSIYASINI RIVOJLANTIRISH

Axadova Komila Said qizi

Dotsent v.b., Jizzax politexnika instituti

e-mail: komila.teacher@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada Sanoat 4.0 (Industry 4.0) konsepsiyasi va raqamli egizaklar (Digital Twin) texnologiyasi sharoitida oliy texnika ta’lim muassasalari talabalarining kompyuter va kompleks modellashtirish kompetensiyasini rivojlantirish metodikasi yoritilgan. Tadqiqotda fizik va raqamli ob’ektlar o‘rtasidagi real vaqtdagi ma’lumotlar almashinuvini o‘quv jarayoniga tatbiq etishning pedagogik va didaktik imkoniyatlari tahlil qilingan. Loyihaga asoslangan va simulyatsion ta’lim yondashuvlari vositasida bo‘lajak muhandislarning analitik fikrlash, parametrik va dinamik modellashtirish hamda virtual monitoring olib borish ko‘nikmalari baholangan. Tajriba-sinov ishlari natijalari raqamli egizaklar texnologiyasidan foydalanish talabalarda nazariy muhandislik bilimlarini amaliy loyihalash va jarayonlarni optimallashtirish bilan uzviy bog‘lash imkonini berishini va ularning kasbiy-raqamli tayyorgarlik darajasini sezilarli darajada oshirishini ko‘rsatdi. Maqola natijalari muhandislik yo‘nalishidagi o‘quv rejalari va raqamli ta’lim platformalarini takomillashtirishda amaliy tavsiya bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: Raqamli egizaklar, Digital Twin, modellashtirish kompetensiyasi, Sanoat 4.0, muhandislik ta’limi, kompyuter modellashtirish, simulyatsion ta’lim, raqamli texnologiyalar.

Kirish. To‘rtinchi sanoat inqilobi (Sanoat 4.0) sharoitida ishlab chiqarish va loyihalash jarayonlarining jadal raqamlashuvi oliy texnika ta’lim muassasasi bitiruvchilariga qo‘yiladigan kasbiy talablarni tubdan o‘zgartirdi. Zamonaviy muhandislik faoliyati nafaqat

obyektlarning statik va 3D modellarini yaratishni, balki fizik ob’ekt va uning raqamli analogi o‘rtasida real vaqtdagi ma’lumotlar almashinuvini ta’minlovchi Raqamli egizaklar (Digital Twin) texnologiyalaridan unumli foydalanishni talab etmoqda (Tao et al., 2018; Qi & Tao, 2018). Shu sababli, bo‘lajak muhandislarning kompyuter va kompleks modellashtirish kompetensiyasini rivojlantirish ta’lim tizimini modernizatsiya qilishning eng ustuvor va dolzarb vazifalaridan biriga aylandi.

Biroq bugungi kunda oliy texnika ta’limi amaliyotida bir qator metodik va struktura-funksional ziddiyatlar ko‘zga tashlanmoqda. Xususan, an’anaviy muhandislik fanlari (nazariy mexanika, oliy matematika, materiallar qarshiligi) va avtomatlashtirilgan loyihalash tizimlari (CAD/CAM/CAE) aksariyat hollarda bir-biridan ajratilgan holda o‘qitiladi (Magana & Coutinho, 2017). Natijada talabalarda "bilimlar transferi defitsiti" (transfer deficit) kuzatilib, ular nazariy parametrlarni raqamli simulyatsiyalarga hamda real vaqtdagi sensor ma’lumotlariga bog‘lashda qiyinchiliklarga duch kelishmoqda (Redish, 2021). Kompyuter dasturlari ko‘pincha shunchaki vizuallashtirish vositasi sifatida o‘rganilib, ob’ektning butun hayotiy siklini (PLM) modellashtirishga yetarlicha e’tibor qaratilmayapti.

Ushbu muammoni bartaraf etish uchun ta’lim jarayoniga Digital Twin texnologiyasining didaktik imkoniyatlarini tatbiq etish zarur. Raqamli egizaklar yondashuvi talabalarga nafaqat ob’ektning geometriyasini loyihalash, balki uning kinematik, dinamik va ekspluatatsion holatlarini virtual muhitda simulyatsiya qilish hamda monitoring olib borish imkonini beradi (Uhlemann et al., 2017; Wright & Davidson, 2020). Bu esa bo‘lajak muhandisda mantiqiy-algoritmik fikrlash, parametrik optimallashtirish va profilaktik diagnostika kabi muhim modellashtirish kompetensiyalarini majmuaviy rivojlantirishga xizmat qiladi.

Tadqiqotning maqsadi — oliy texnika ta’lim muassasalarida Raqamli egizaklar (Digital Twin) texnologiyasi va fanlararo integratsiyaga asoslangan pedagogik modelni ishlab chiqish hamda u orqali bo‘lajak muhandislarning modellashtirish kompetensiyasini takomillashtirish samaradorligini tajriba-sinov ishlari vositasida asoslab berishdan iborat.

Adabiyotlar tahlili. To‘rtinchi sanoat inqilobi va kibernetik-fizik tizimlarning (CPPS) rivojlanishi muhandislik ta’limida modellashtirish konsepsiyasini tubdan o‘zgartirdi. Zamonaviy tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, an’anaviy statik modellashtirish usullari Sanoat 4.0 talablariga javob bera olmaydi va raqamli egizaklar texnologiyasiga o‘tishni talab qiladi.

1. Sanoat va ta’limda Raqamli egizaklar (Digital Twin) konsepsiyasi

Raqamli egizak (Digital Twin) tushunchasi dastlab ishlab chiqarish tizimlarida fizik ob’ekt va uning virtual nusxasi o‘rtasida real vaqtdagi ma’lumotlar oqimini ta’minlash vositasi sifatida shakllandi (Tao et al., 2018). Wright va Davidson (2020) ta’kidlashicha, oddiy 3D kompyuter modelidan farqli o‘laroq, Raqamli egizak fizik ob’ekt sensorlaridan keluvchi ma’lumotlar asosida o‘zining dinamik holatini o‘zgartiradi va simulyatsiya qiladi.

Abele va boshqalar (2017) hamda Kritzinger va boshqalarning (2018) ta’lim sohasidagi ishlarida ta’kidlanishicha, ta’lim jarayoniga Digital Twin texnologiyasini tatbiq etish talabalarga ob’ektning butun hayotiy siklini (PLM) kuzatish, nosozliklarni oldindan bashorat qilish (predictive maintenance) hamda murakkab muhandislik tizimlarini virtual muhitda boshqarish imkonini beradi.

2. Muhandislik ta’limida modellashtirish kompetensiyasi va metodik muammolar

Muhandislik ta’limida kompyuter modellashtirish va simulyatsiya ko‘nikmalarini shakllantirish bo‘yicha ko‘plab ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Felder va Brent (2016) hamda Magana va Coutinho (2017) o‘z ishlarida talabalarning kompyuter dasturlari (CAD/CAE) bilan ishlashdagi asosiy muammolaridan biri — "qora quti" (black-box) effekti ekanligini ko‘rsatib o‘tishadi. Ya’ni, talabalar dasturga ma’lumotlarni kiritadi hamda natijani ko‘radi, lekin ortda chiquvchi fizik va matematik qonuniyatlarni chuqur tushunmaydi.

Shuningdek, Redish (2021) va Sackey hamda Bester (2016) tadqiqotlarida fanlararo uzilish muammosi ko‘tariladi: matematika, nazariy mexanika va kompyuterli loyihalash fanlari bir-biridan ajratilgan holda o‘qitilishi sababli, talabalarda real fizik jarayonlarni raqamli simulyatsiyalarga ko‘chirish (kognitiv transfer) qiyinlashadi.

3. Simulyatsion va loyihaga asoslangan ta’lim yondashuvlari (PBL)

Ushbu metodik uzilishlarni bartaraf etish uchun qator tadqiqotchilar (Mills & Treagust, 2003; Prince & Felder, 2006) Loyihaga asoslangan ta’lim (Project-Based Learning — PBL) hamda simulyatsion ta’lim muhitlarini taklif etishadi. So‘nggi yillardagi tadqiqotlar (Uhlemann et al., 2017; Qi & Tao, 2018) shuni ko‘rsatadiki, Digital Twin platformalari bazasida tashkil etilgan PBL yondashuvi talabalarga nazariy formulalarni amaliy sensor ma’lumotlari bilan solishtirish, mesh-turlarni optimallashtirish va dinamik modellashtirish imkonini beradi.

4. Tadqiqotdagi bo‘shliq (Research Gap)

Mavjud ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, Raqamli egizaklar texnologiyasining sanoatdagi o‘rni keng yoritilgan bo‘lsa-da, uni oliy texnika ta’lim muassasalarining o‘quv jarayoniga didaktik va metodik jihatdan moslashtirish, xususan, talabalarda bosqichma-bosqich **modellashtirish kompetensiyasini** rivojlantirishning aniq pedagogik modeli hamda baholash mezonlari yetarlicha ishlab chiqilmagan.

Tadqiqot metodologiyasi. Ushbu tadqiqotda Digital Twin (Raqamli egizaklar) texnologiyasi va fanlararo integratsiya bazasida bo‘lajak muhandislarning modellashtirish kompetensiyasini shakllantirish samaradorligi empirik va pedagogik tajriba-sinov usullari vositasida baholandi.

1. Tadqiqot strukturasi va eksperiment dizayni

Tadqiqot pedagogik eksperimentning **kvazi-eksperimental (Pre-test / Post-test)** modeliga asoslandi. Tajriba davomida an’anaviy o‘quv rejasi bo‘yicha tahsil olgan nazorat guruhi hamda Digital Twin va simulyatsion ta’lim platformalariga asoslangan taklif etilayotgan metodika bo‘yicha o‘qitilgan tajriba guruhi ko‘rsatkichlari solishtirildi.

Modellashtirish kompetensiyasini rivojlantirish 3 ta mantiqiy bosqichdan iborat bo‘lgan loyihaga asoslangan (PBL) ta’lim trayektoriyasi bo‘yicha amalga oshirildi:

- **1-bosqich: Virtual va parametrik geometriya (3D Digital Mock-up).** Talabalar fizik ob’ektning CAD tizimlarida (SolidWorks / ANSYS) 3D geometrik va kinematik modelini yaratadilar, material xossalarini kiritadilar.
- **2-bosqich: Sensor ma’lumotlari va dinamik simulyatsiya (Data Integration &**

IoT). Ob’ektga o‘rnatilgan virtual yoki real sensorlardan (bosim, harorat, tebranish) keluvchi ma’lumotlar oqimi modellashtirish muhitiga integratsiya qilinadi va ob’ektning dinamik holati simulyatsiya qilinadi.

- **3-bosqich: Virtual monitoring, bashorat va optimallashtirish (Predictive Analytics).** Talabalar raqamli egizak orqali ob’ektning ekspluatatsiya jarayonidagi nosozliklarini oldindan bashorat qiladilar (predictive maintenance) va tizim ko‘rsatkichlarini optimallashtiradilar.

3. Tadqiqot ishtirokchilari (Tanlanma)

Tajriba-sinov ishlari oliy texnika ta’lim muassasasining muhandislik yo‘nalishidagi 3-bosqich talabalari o‘rtasida o‘tkazildi. Tadqiqotga jami N=120 nafar talaba jalb etilib, ular teng ikkita guruhga ajratildi:

- **Nazorat guruhi (n=60):** Muhandislik fanlari va CAD/CAE dasturlarida ishlash an’anaviy, alohida o‘quv modullari ko‘rinishida olib borildi.
- **Tajriba guruhi (n=60):** O‘quv jarayoni Digital Twin platformalari (masalan, ANSYS Twin Builder / Siemens Simcenter) hamda fanlararo simulyatsion topshiriqlar integratsiyasi asosida tashkil etildi.

4. Ma’lumotlarni yig‘ish va baholash mezonlari

Talabalarning modellashtirish kompetensiyasini obyektiv baholash uchun 4 ta asosiy mezon va 100 ballik shkala belgilandi:

1. **Fizik-matematik va parametrik tahlil (FMT):** Real jarayonlarni matematik va parametrik tenglamalarga ko‘chirish qobiliyati.

2. **Dinamik va simulyatsion modellashtirish (DSM):** Sensor ma’lumotlarini virtual model bilan bog‘lash hamda dinamik simulyatsiyalarni sozlash ko‘nikmasi.

3. **Virtual diagnostika va optimallashtirish (VDO):** Tizimdagi xatoliklarni aniqlash, mesh va chegaraviy shartlarni optimallashtirish.

4. **Tizimli fikrlash va verifikatsiya (TFV):** Raqamli egizak bergan natijalarni real fizik jarayonlar bilan solishtirib, mustaqil xulosa chiqarish.

5. Statistik tahlil usullari

Ma’lumotlarni statistik qayta ishlash **IBM SPSS Statistics** dasturiy ta’minoti yordamida amalga oshirildi. Dastlabki va yakuniy natijalar o‘rtasidagi farqning statistik ishonchliligini baholash uchun **Styudentning t-meyori (t-test)** hamda pedagogik ta’sir kuchini aniqlash uchun **Koen effekti ko‘rsatkichidan (Cohen’s d)** foydalanildi.

Natijalar. Tajriba-sinov ishlarining samaradorligini baholash uchun tajriba (n=60) va nazorat (n=60) guruhlarida eksperimentdan oldingi (Pre-test) va eksperimentdan keyingi (Post-test) ko‘rsatkichlar tahlil qilindi.

1. Dastlabki va yakuniy bosqich natijalari tahlili

Tajribagacha o‘tkazilgan dastlabki diagnostika (Pre-test) natijalari ikkala guruh talabalarining modellashtirish kompetensiyasi bo‘yicha bilim va ko‘nikmalar darajasi bir xil (statistik farqsiz) ekanligini ko‘rsatdi. Oalti oylik o‘quv jarayonidan so‘ng o‘tkazilgan yakuniy baholashda (Post-test) tajriba guruhida barcha mezonlar bo‘yicha sezilarli o‘sish kuzatildi.

Mezonlar	Nazorat guruhi (n=60) Pre-test	Tajriba guruhi (n=60) Pre-test	Nazorat guruhi (n=60) Post-test	Tajriba guruhi (n=60) Post-test	O‘sish (Δ) Tajriba gr.
Fizik-matematik va parametrik tahlil (FMT)	58.4±6.2	57.9±6.5	64.2±5.8	82.6±5.1	+24.7
Dinamik va simulyatsion modellashtirish (DSM)	52.1±7.1	51.8±6.9	60.5±6.4	85.4±4.8	+33.6
Virtual diagnostika va optimallashtirish (VDO)	48.3±6.8	49.0±7.2	56.8±6.1	79.8±5.4	+30.8
Tizimli fikrlash va verifikatsiya (TFV)	55.0±6.0	54.6±6.3	62.1±5.9	81.2±5.0	+26.6
O‘rtacha umumiy ball	**53.45**	**53.32**	**60.90**	**82.25**	**+28.93**

2. Talabalarning kompetensiya darajalari bo‘yicha taqsimoti

Talabalarning modellashtirish kompetensiyasi o‘zlashtirish ko‘rsatkichiga ko‘ra uchta darajaga ajratildi: **Boshlang‘ich** (<60 ball), **O‘rta** (60−79 ball) va **Yuqori** (80−100 ball).

• **Boshlang‘ich daraja:** Tajriba guruhida eksperimentdan so‘ng boshlang‘ich darajadagi talabalar ulushi 63.3% dan 5.0% ga tushdi (nazorat guruhida esa 61.7% dan 38.3% ga kamaydi).

• **Yuqori daraja:** Digital Twin va simulyatsion metodika asosida ta’lim olgan tajriba guruhida yuqori darajani egallagan talabalar ulushi 68.3% ni tashkil etdi. An’anaviy usulda o‘qitilgan nazorat guruhida bu ko‘rsatkich atigi 18.3% bo‘lib qoldi.

3. Matematik-statistik gipotezani tekshirish

Olingan natijalarning ishonchliligini tasdiqlash uchun Styudentning t-meyori (t-test) va Koen effekti (Cohen′s d) hisoblab chiqildi:

• **Styudent t-meyori:** Tajriba va nazorat guruhlarining Post-test natijalari bo‘yicha thisob=8.42 ni tashkil etdi. $p<0.001$ erkinlik darajasida thisob>tjadval (2.001) bo‘lganligi sababli, ikki guruh o‘rtasidagi farq statistik jihatdan yuqori darajada ishonchli deb topildi.

• **Pedagogik ta’sir kuchi (Cohen’s d):** Hisoblangan ko‘rsatkich d=1.54 ga teng bo‘ldi. Bu Digital Twin texnologiyasiga asoslangan pedagogik modelning ta’lim samaradorligiga o‘ta yuqori (d>0.8) ijobiy ta’sir ko‘rsatganligini anglatadi.

Muhokama

Tajriba-sinov ishlaridan olingan statistik natijalar Digital Twin texnologiyasini oliy texnika ta’limi jarayoniga tatbiq etish bo‘lajak muhandislarning modellashtirish kompetensiyasini oshirishda yuqori samaradorlikka ega ekanligini tasdiqladi (tajriba guruhida o‘rtacha umumiy ko‘rsatkich +28.93 ballga oshdi, d=1.54). Ushbu natijalar muhandislik ta’limidagi zamonaviy pedagogik va didaktik tendensiyalar kontekstida quyidagicha tahlil qilinadi.

1. Dasturiy vizuallashtirishdan dinamik va real vaqt simulyatsiyasiga o‘tish

An’anaviy ta’lim usulida (nazorat guruhi) kompyuterli loyihalash (CAD/CAE) ko‘pincha ob’ektning shakli va geometriyasini statik modellashtirish bilan cheklanib qolmoqda. Bu esa Felder va Brent (2016) ta’kidlagan "qora quti" (black-box) effektini keltirib chiqaradi: talabalar dasturiy vositalardan foydalanadi, lekin modellashtirish ortida turgan dinamik jarayonlarni to‘liq anglamaydi. Tajriba guruhida esa Digital Twin vositasida

fizik ob’ekt va uning raqamli modeli o‘rtasida sensor ma’lumotlari (IoT) asosida real vaqt rejimida aloqa o‘rnatilishi talabalarning dinamik va simulyatsion modellashtirish (DSM) ko‘nikmalarini +33.6 ballga oshirish imkonini berdi. Bu ko‘rsatkich Wright va Davidson (2020) hamda Qi va Tao (2018) tadqiqotlaridagi "raqamli egizak ob’ektning butun hayotiy siklini virtual muhitda namoyon etadi" degan nazariy qarashlarni amaliy jihatdan isbotlaydi.

2. Fanlararo uzilish va kognitiv transfer muammosining yechimi

Magana va Coutinho (2017) hamda Redish (2021) tadqiqotlarida ta’kidlanganidek, muhandislik ta’limida eng murakkab bo‘sag‘alardan biri — nazariy fanlar (oliy matematika, nazariy mexanika) va amaliy dasturiy loyihalash o‘rtasidagi uzilishdir. Ishlab chiqilgan pedagogik model doirasida talabalar nazariy tenglamalarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri simulyatsiya parametrlari bilan bog‘lashdi, bu esa Ularning Fizik-matematik va parametrik tahlil (FMT) mezonini 82.6 ballgacha yetkazishini ta’minladi. Real vaqt rejimida sensorlardan kelayotgan fizik parametrlar (tebranish, bosim, harorat) va virtual model o‘rtasidagi farqni tahlil qilish talabalarda kognitiv transferni sezilarli darajada tezlashtirdi.

3. Diagnostik va bashorat qilish ko‘nikmalarining shakllanishi

An’anaviy yondashuvda talabalar asosan tayyor topshiriqlar bo‘yicha ideal sharoitdagi modellarni qurishadi. Raqamli egizaklar platformalari doirasida tashkil etilgan Loyihaga asoslangan ta’lim (PBL) esa talabalarga real ekspluatatsiya sharoitida yuzaga keladigan nosozliklarni oldindan bashorat qilish (predictive maintenance) va parametrlarni optimallashtirish imkonini berdi (VDO mezoni bo‘yicha +30.8 ballik o‘sish). Bu holat Uhlemann va boshqalarning (2017) Sanoat 4.0 sharoitida muhandislardan nafaqat loyihalash, balki kibernetik-fizik tizimlarni virtual diagnostika qilish ko‘nikmalari talab etilishi haqidagi xulosalarini to‘liq quvvatlaydi.

4. Cheklovlar va kelgusi tadqiqot yo‘nalishlari

Tadqiqot jarayonida ma’lum cheklovlar ham ko‘zga tashlandi. Digital Twin texnologiyasini to‘liq formatda joriy etish yuqori hisoblash quvvatiga ega modellashtirish laboratoriyalari va dasturiy litsenziyalarni (ANSYS Twin Builder, Siemens Simcenter) talab etadi. Kelgusi tadqiqotlarda sun’iy intellekt (AI) algoritmlarini va bulutli Digital Twin

platformalarini o‘quv jarayoniga integratsiya qilish hamda ushbu yondashuvni boshqa muhandislik yo‘nalishlari bo‘yicha kengaytirish ko‘zda tutilgan.

Xulosa

Oliy texnika ta’lim muassasalarida Raqamli egizaklar (Digital Twin) texnologiyasi va fanlararo integratsiyaga asoslangan pedagogik modelni joriy etish bo‘yicha olib borilgan ilmiy-amaliy tadqiqot quyidagi muhim xulosalarni chiqarish imkonini beradi:

1. **Nazariy va didaktik asoslandik:** Sanoat 4.0 sharoitida bo‘lajak muhandislarning modellashtirish kompetensiyasini rivojlantirish an’anaviy statik 3D loyihalashdan (CAD) fizik ob’ekt va virtual model o‘rtasidagi real vaqtdagi ma’lumotlar almashinuviga (Digital Twin) o‘tishni talab etadi. Taklif etilgan pedagogik model talabalarda "bilimlar transferi defitsiti" va "qora quti" efektini bartaraf etishga xizmat qildi.

2. **Tajriba-sinov samaradorligi:** O‘tkazilgan kvazi-eksperimental tadqiqot natijalari tajriba guruhida modellashtirish kompetensiyasining barcha mezonlari bo‘yicha keskin o‘sishni ko‘rsatdi. Tajriba guruhida o‘rtacha umumiy ko‘rsatkich 53.32 balldan 82.25 ballgacha ($+28.93$ ball) ko‘tarildi. Yuqori darajani egallagan talabalar ulushi 68.3% ni tashkil etdi (nazorat guruhida atigi 18.3%).

3. **Statistik ishonchlilik:** Styudentning t-meyori ($t_{hisob} = 8.42, p < 0.001$) va Koen effekti ($Cohen's\ d = 1.54$) ishlab chiqilgan simulyatsion va loyihaga asoslangan (PBL) ta’lim metodikasining o‘quv jarayoniga ijobiy ta’siri va pedagogik samaradorligi o‘ta yuqori ekanligini matematik-statistik jihatdan to‘liq tasdiqladi.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. Abele, E., Metternich, J., & Tisch, M. (2017). Learning Factories: Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92261-4

2. Felder, R. M., & Brent, R. (2016). Teaching and Learning STEM: A Practical Guide. Jossey-Bass.

3. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

4. Magana, A. J., & Coutinho, G. S. (2017). Modeling and simulation practices in engineering education. Computers in Education Journal, 8(2), 1–15.

5. Mills, J. E., & Treagust, D. F. (2003). Engineering education — Is problem-based or project-based learning the answer? Australasian Journal of Engineering Education, 3(1), 2–16.

6. Prince, M. J., & Felder, R. M. (2006). Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. Journal of Engineering Education, 95(2), 123–138. https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x

7. Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. IEEE Access, 6, 3585–3593. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265

8. Redish, E. F. (2021). Using math in physics: 1. Schema integration and the physics-math translation pipeline. European Journal of Physics, 42(2), 025702. https://doi.org/10.1088/1361-6404/abcb8a

9. Sackey, S. M., & Bester, A. (2016). Industrial engineering curriculum in Industry 4.0 era. South African Journal of Industrial Engineering, 27(3), 101–114. https://doi.org/10.7166/27-3-1579

10. Tao, F., Zhang, M., & Nee, A. Y. (2018). Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2017-0-02264-7

11. Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The Digital Twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. Procedia CIRP, 61, 335–340. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152

12. Wright, L., & Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a Digital Twin. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 7(1), 13. https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4