

Simon Dóra Erika¹, Rák Olivér², Bakai Nándor³

AZ ÉPÍTŐIPARI MUNKABALESETEK MEGELŐZÉSÉT CÉLZÓ, BIM ALAPÚ VIRTUÁLIS VALÓSÁG FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF THE POTENTIAL USES OF BIM BASED VIRTUAL REALITY
FOCUSING ON CONSTRUCTION ACCIDENT PREVENTION

KIVONAT / HUN

A modern technológiák építőipari integrálása jelentős előnyöket hozhat a tervezés, a kivitelezés, a balesetmegelőzés és az oktatás területén. A PTE MIK BIM Skills Lab kutatócsoport a digitális technológiák közül az építményinformációs modellezés (BIM) és a virtuális valóság (VR) lehetőségeit is vizsgálja, melyek új dimenziókat nyithatnak az építőipari szakemberek számára. Jelen tanulmány célja, hogy feltárjuk, hogyan használható a tervezés során készülő BIM modell és a VR technológia az építőipari balesetmegelőzést támogató oktatásban, és milyen előnyökkel járhat a szakemberek számára, illetve, hogy egy ilyen oktatási forma eredményesebb lehet-e, mint a hagyományos oktatási formák. A kutatással az építőipari digitalizáció elterjedését kívánjuk elősegíteni, mellyel a jövőbeni BIM és VR kutatások megalapozottsága támogatható.

Kulcsszavak: virtuális valóság (VR), építményinformációs modellezés (BIM), építéshelyi biztonság, balesetvédelmi oktatás

ABSTRACT / ENG

The integration of modern technologies into the construction industry can bring significant benefits in the areas of design, construction, accident prevention and education. The UP FEIT BIM Skills Lab research group is also exploring the possibilities of building information modelling (BIM) and virtual reality (VR) among the digital technologies, which can open new dimensions for construction professionals. The aim of this research is to explore how BIM models and VR technology can be used in trainings supporting accident prevention in the construction industry, what benefits it can bring to experts, and whether such a form of education can be more effective than the knowledge acquired through traditional forms of education. The research is intended to support the spread of digitalisation in the construction industry, which will help to establish the basis for future BIM and VR research.

Keywords: virtual reality (VR), building information modelling (BIM), construction safety, health and safety training

ektorált tartalom

¹ építészmérnök hallgató, junior kutató, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, BIM Skills Lab, e-mail.: sidoraer@gmail.com

² szerkezettervező építészmérnök, PhD, egyetemi adjunktus, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék; kutatócsoport tag, témavezető, BIM Skills Lab, e-mail: rak.oliver@mik.pte.hu

³ építészmérnök, kutatócsoport tag, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék, BIM Skills Lab, e-mail: bakai.nandor@mik.pte.hu

1. | A BIM SKILLS LAB KUTATÓ-CSOPORT

A BIM Skills Lab kutatócsoport a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Karán működik. Fő kutatási területe a BIM (Building Information Modelling – Építményinformációs modellezés) technológiák felhasználási módjainak kidolgozása, bővítése és a mindennapi építészeti munkába való integrálásának elősegítése. A tagok között oktatók és hallgatók is egyaránt vannak, azzal a céllal, hogy a közös és egyéni kutatásokban is segítsék egymást. Ezen kutatások létrejöttét számos módon segíti a BIM Skills Lab, köztük a széles körű eszközpark biztosításával. Jelen kutatás egy Meta Quest VR szemüveg használatával készült, illetve számos más, mérő és dokumentáló eszköz alkalmazásával, melyet a BIM Skills Lab, a Pécsi Tudományegyetem és a Huawei Technologies Hungary Kft. biztosított a munkához.

2. | A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

Az építőipar az egyik legkiszámíthatatlanabb iparág a balesetek szempontjából. Számos előrelátható és előre nem látható veszélyt rejt minden építkezési folyamat. Előzetes, helyszíni balesetmegelőzési oktatásra ritkán van lehetőség, így csak általános munkavédelmi szabályozásokkal, munkavédelmi eszközökkel lehetséges megelőzni a problémát, ami sajnos, sokszor nem bizonyul elegendőnek.

A BIM Skills Lab kutatócsoport egy korábbi kutatása [1], az elmúlt 20 év munkabaleseteinek statisztikáit elemezte. Ez a kutatás kimutatta, hogy a magyarországi munkabalesetek több mint 5%-a az építőiparban történik (az összes nemzetgazdasági ágazatot figyelembe véve). Ez a szám azonban valószínűleg magasabb is lehet, a nem regisztrált munkabalesetekből adódóan. A kutatásban arra is fény derült, hogy semelyik másik iparág nem rendelkezik ilyen magas halálos kimenetelű baleseti aránnyal (átlagosan 2,76%). Ez önmagában is bizonyítja a biztonság és a balesetmegelőzési óvintézkedések szükségességét az építkezéseken, hiszen a többi ágazat átlagához képest közel kilencszeres arány miatt magas baleseti kockázatú iparágak minősül.

Ehhez véleményünk szerint nagyban hozzájárulhat, hogy napjainkban a legtöbb balesetvédelmi oktatás, általános, gyors összefoglaló oktatás. Egy hétköznapi helyzetben, tényeken alapuló és megtervezett szituációk alapján tartott tradicionális oktatás nehezen tartja fent a hallgatóság figyelmét, különösen, ha az oktatás egy nap alatt zajlik le, és az egyénnek akár 8 órán keresztül fókuszáltan kell figyelnie. Ez az oktatási forma nem képes támogatni a kognitív tanulás mélyebb formáit, valamint a tudás megőrzését.

A technológia fejlődése azonban számos új lehetőséget kínál, amelyeket kihasználva, innovatív módon lehet újra gondolni a balesetmegelőzési oktatásokat. Ez reményeink szerint lehetővé tenné a fent említett balesetszámok mérséklését is. Kutatócsoportunk aktívan vizsgálja ezen lehetőségeket, köztük a virtuális valóság (VR) technológia kínált megoldásokat is.

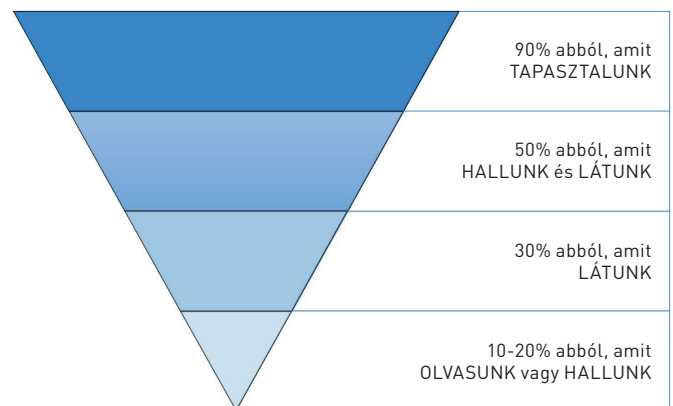
A virtuális valóság egy számítógép által generált 3D szimuláció, amellyel a térbe belépő személy interakciót végezhet például egy headseten és kontrollereken keresztül a környe-

zetével. Ezáltal ez a technológia képes arra, hogy egy még nem létező területet elérhetővé, bejárhatóvá tegyen. Biztonságos, veszélyektől mentes környezetet lehet benne kialakítani, ahol bármilyen szituációt szimulálni lehet. Ez azért fontos, mert ezzel egy olyan új megoldást tudunk az építőipari oktatásba integrálni, amelyre korábban nem volt lehetőség: a valós veszélyektől mentes „helyszíni” gyakorlati oktatást.

A legjelentősebb eredmény egy ilyen oktatási módszer alkalmazásával, az oktatás minőségének drasztikus változása lehetne. Az oktatási rendszer digitalizálása, annak lehetséges formái már több éve foglalkoztatja a terület kutatóit [2]. Számos kutatás bizonyítja, hogy jelentős előnnyel járhat, és az egyik kiemelt lehetséges tudománykommunikációs eszköz a VR. Ez az eszköz gyorsíthatja és egyszerűsítheti is a tanulási folyamatot, akár egyéni akár csoportos munkában is [3]. Éléményszerűsége miatt tapasztalati tudást lehet szerezni az ilyen környezetben elvégzett oktatás során, így széleskörűen alkalmazható információ bemutató eszköz lehet professzionális és nem professzionális területen is [4]. A VR számos hazai és külföldi egyetemen is aktívan használt oktatási eszköz, bár főleg csak művészeti, építészeti téren [5].

Az oktatási területen már a XX. században is készítettek kutatásokat a tapasztalati úton szerzett tudás értékéről, többek között Edgar Dale is, akinek a nevéhez kötődik a tanulás piramisa is, amely napjainkban is hatással van az oktatásra [6]. Elmélete szerint a tanulási módszerekről számszerűsítve a következő mondható el: a tanulók átlagosan az olvasottak 10-20%-ára, a látottak 30%-ára, a hallottak és a látottak 50%-ára, míg a tapasztaltak 90%-ára emlékeznek 2 héttel a tanulás után (1. ábra).

A VR ezért lehet egy remek eszköze a balesetvédelmi oktatásnak is. Az ilyen környezetben elvégzett oktatás hozzájárulhat a munkahelyi balesetek csökkentéséhez, a munkavállalók biztonságának növeléséhez, valamint enyhítheti az építőiparban az új munkavállalók felkészítésével járó kihívásokat. Jelenleg is számos kutatás foglalkozik a VR alkalmazhatóságával a területen [7], mely kutatások valószínűleg találják a VR oktatásba történő integrálását. A technológia iránti érdeklődés következtében, erőteljesen fellendült a VR szemüveg fejlesztése is, így egyre jobb eszközök kerülnek a piacra, melyek könnyű beszerezhetősége, előrerendelhető a VR oktatásba történő integrálását is. Ennek létrejöttéhez azonban, még számos tesztre, tudományos vizsgálatra van



1. ÁBRA: Edgar Dale tanulás piramisa [6]

szükség, melyekben több kutató is a végfelhasználók által produkált eredmények összehasonlítását szorgalmazza [8], ezáltal bebizonyítva a virtuális valóság adta lehetőségek létjogosultságát. Kutatásunk többek között, erre a problémára igyekezett választ keresni.

3. | A KUTATÁS CÉLJA

A kutatás fő célja annak feltárása, hogy a virtuális valóság alapú balesetvédelmi oktatás integrálása az építőipar mindennapjaiba hasznos lehet-e, milyen előnyökkel járhat, javíthat-e a drasztikus statisztikákon. Az előzetes kutatások során számos, a témához kapcsolódó nemzetközi tudományos cikket, publikációt és projektet megvizsgáltunk. Több átfogó cikk is foglalkozik a VR technológiával, mint általános oktatási eszközzel. Ezekben a cikkekben kutatásokon és teszteken keresztül igyekeztek elemezni az elmúlt években történt előrelépéseket, a technológia fejlődését és a lehetséges jövőbeli irányzatokat is. Ezek a cikkek számunkra is relevánsak voltak, hiszen amellett, hogy betekintést nyújtottak a VR általános fejlődésébe és alkalmazhatóságába, kimutatták, hogy a VR alapú oktatási kísérletek között kiemelkedő szerepet töltenek be a balesetvédelmi oktatásokra tett kísérletek [9] [10].

A balesetvédelmi oktatásra szűkített vizsgálataink során azonban azt tapasztaltuk, hogy a kutatások többsége csupán az építőipar bizonyos veszélyes területeire fókuszál, például elektromos árammal [11], darukezeléssel [12] kapcsolatos munkálatokra, vagy akár a kézi irányítású robotok bontási munkálataira [13].

Jelen kutatás több szempontból is eltér a korábbiaktól. A vizsgálat célja annak alátámasztása vagy cáfolata volt, hogy az általános balesetmegelőzést és a mindennapi munkavégzést eredményesebben segítheti-e a virtuális valóságban létrehozott oktatási szimuláció, összehasonlítva a hagyományos oktatási módszerekkel. Ezenkívül azt is megvizsgáltuk, hogy egy ilyen oktatás kivitelezhető lenne-e, és hogyan illeszkedne az épület vagy építmény BIM modell életciklusába.

4. | A VIZSGÁLAT LEBONYOLÍTÁSA

A kutatás fő eszköze egy összehasonlításra alapuló teszt volt, amelyhez számos előzetes munkarész elkészítésére, többek között a 2D dokumentáció és a 3D modell (2. ábra) elkészítésére volt szükség. A vizsgálat a következők szerint épült fel: három csoport háromféle oktatási módszerrel, ugyanazt az információt kapta meg. Az oktatáson részt vett személyek két héttel később egy ingerszegény, valós környezetben bemutatták, hogy mire emlékeznek az oktatásról. A teszteket különböző beszerzett és fejlesztett eszközökkel is megfigyeltük. Az így kapott eredményeket összehasonlítva és kiértékelve választ kaptunk a kutatás kitűzött céljait illetően. A kísérletben az egyetemi hallgatóság vett részt, akik felkérésre csatlakoztak a kutatáshoz.

A kutatás első lépéseként, egy megfelelő területet kellett választani a teszt végrehajtásához. A területnek számos kri-



2. ÁBRA: A virtuális valóságban létrehozott tér

tériumnak kellett megfelelnie. A teszt végső célja miatt egy már létező területre volt szükség, hogy a valós területbejárás kivitelezhető legyen az oktatások közötti különbségek elemzéséhez. A területnek a dokumentáció miatt felülről átláthatónak kellett lennie, valamint a teszt miatt könnyen berendezhető, illetve kiüríthető kellett legyen. Továbbá a kutatás elsődleges szempontja az volt, hogy egy a mindennapi építési munkába beilleszthető metódust alakítsunk ki, amely megkövetelte az épület terveinek elérhetőségét. Ezek alapján a választás a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar területén található parkolóra esett, amelyhez egy lépcső-sor és egy erkélyrész kapcsolódik. Ez lehetővé tette egy kamera elhelyezését és a tesztek dokumentálását.

Az épületet a kutatócsoport segítségével megmodelleztük (a Graphisoft Archicad szoftver használatával), majd a modelltől leválasztva készültek el a 2D tervek. Ezek a tervek és a modell, jelentették a VR szimuláció alapköveit is (3. és 4. ábra). A 3D modell, poligonszám optimalizálás után, felhasználható volt a VR szimulációs térben, így abban külön építészeti modellelemeket nem kellett létrehozni. Ezzel további felhasználási módot is teremthetünk a korábban elkészült, tervezési fázist támogató modellek esetén. A modelltől leválasztott 2D dokumentáció alapján egy egyszerű munkafázist jelöltünk ki a kiválasztott területen.

A feladat a terület megtisztítása a törmeléktől és az érkező szállítmány megfelelő elhelyezése volt, miközben a résztvevőknek a kijelölt veszélyzónákra (állványzat, robbanásveszélyes anyagok, törmelék hullásának veszélye) is figyelniük kellett. A feladat elkészítésekor az egyszerűsége való törekvés több szempontból is indokolt volt. Elsősorban azért, hogy megfigyelhető legyen, vajon egy általános, egyszerű feladat esetén is kimutatható-e különbség a különböző oktatási módszerek hatékonysága között.



3. ÁBRA: Az oktatás utasításai szöveges információ formájába a VR térben



4. ÁBRA: A veszélyzóna a VR térben

A tervek és modellek előkészítése után három különböző oktatási módszert dolgoztunk ki:

- Az első módszer egy tantermi oktatás volt, amely 2D tervek alapján készült és rajzi, valamint szóbeli instrukciókkal egészült ki.
- A második módszer egy VR szimuláció készítése volt, az Unity szoftver felhasználásával. A szimulációban egy teljesen interaktív felületet hoztunk létre, melyben a felhasználó kezdeményezi és hajtja végre az interakciókat, így a feladatok teljesítéséhez figyelemre és koncentrációra van szüksége.
- A harmadik módszer során az elkészült szimulációból készült egy 360°-os videó, amelyben a felhasználó megfigyelőként vesz részt, nincs ráhatása az eseményekre, és nem tud interakciót kezdeményezni a tér elemeivel.

A jelentkezőket három csoportra bontottuk, akik külön-külön a három oktatási módszer egyikével megkapták ugyanazt az információt. A csoportokat két héttel az oktatás elvégzése után visszahívtuk, hogy a tényleges területen, emlékezet alapján végezzék el a feladatokat a megadott veszélyzónák elkerülésével. A teszterület a feladat szempontjából üres volt (sajnos egy nem mozgatható akadály került a területre, a kutatástól függetlenül). A résztvevőknek egy ingerszegény környezetben kellett az elhangzottakat felidézni, így csak a megtanultak alapján tudtak nekilátni a feladatnak.

A tesztek dokumentálása céljából a kutatócsoport segítségével létrehoztunk egy egyszerű mozgáskövető alkalmazást. Ez az alkalmazás egy magaslati ponton elhelyezett kamerán keresztül dokumentálta a tesztek során a hallgatók által megtett útvonalat, a teszt idejét, és azt, hogy mennyi időt töltek a résztvevők a kijelölt veszélyzónákban.

A program a videofelvételen egy színfoltot követett, ami egy élénk narancssárga színű munkavédelmi sisak volt. Így a program a tesztalany fejének mozgását követte (5. ábra). Ebből kifolyólag, illetve a kamera torzítása miatt, a kapott útvonalakat manipulálni kellett a 2D dokumentációhoz. Ennek metodikája a kapott képek azonos értékekkel történő torzítása volt, egy fix pont (origo) kijelölése után. Ez a pont egy fixen



5. ÁBRA: A mozgást érzékelő, követő program és a kinyerhető útvonal

elhelyezett elem pozíciója volt. A felvételek elemzéséből nyert eredményeket több módon is összehasonlítottuk.

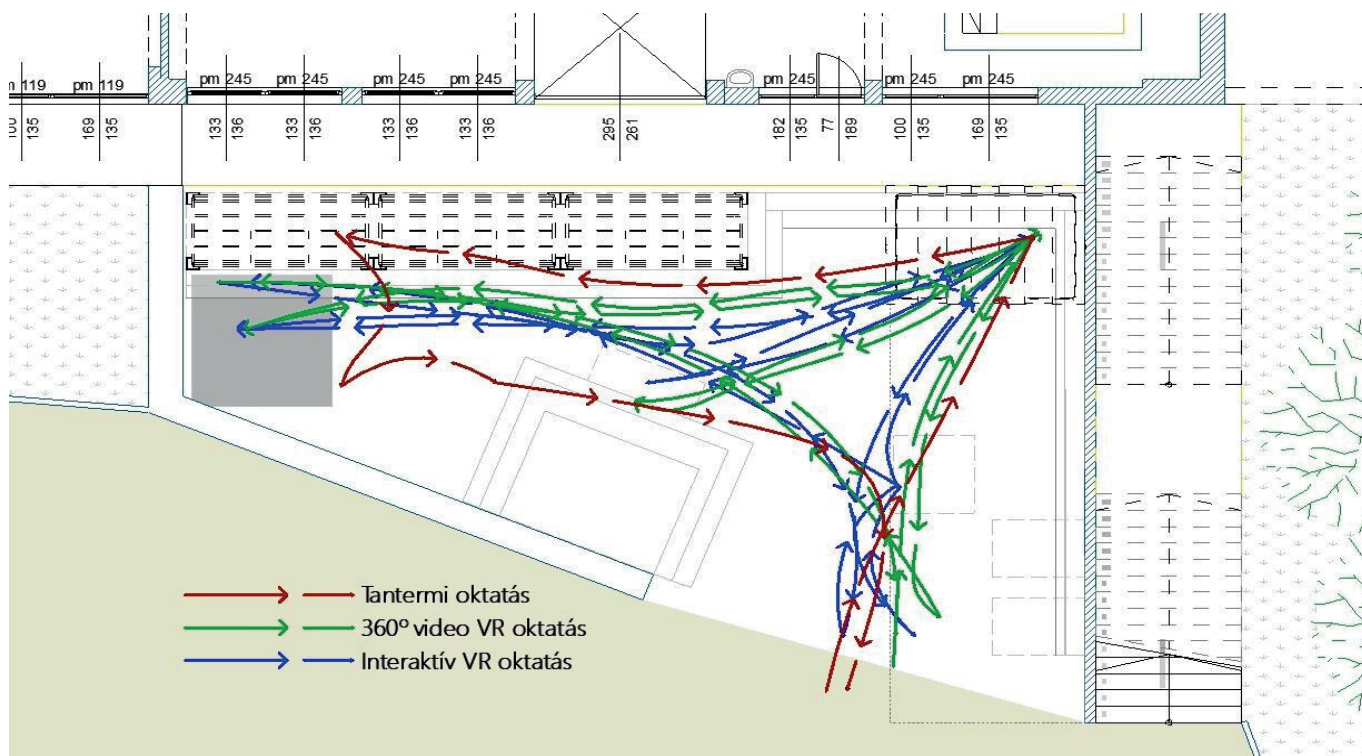
Elsősorban az azonos oktatási csoportban résztvevők eredményeit hasonlítottuk össze (1. táblázat). A VR alapú oktatási csoportok összehasonlítása könnyen elemezhető volt. Az eredmények közel azonosak voltak a teszt alanyok között, csupán egy-két kritikus értéket adtak. A tantermi oktatáson résztvett csoport értékei azonban a csoporton belül is releváns kilengéseket mutattak. A feladatot többségében elvégezték, azonban teljesítés ideje, a veszélyzónákba történő belépés és az ott eltöltött idő mértéke is drasztikusan magasabb volt a VR-os oktatáson résztvett tesztalanyokéhoz képest.

A második fázisban a különböző oktatási csoportok átlagainak összehasonlítására került sor (6. ábra). A 360°-os videó alapú oktatáson, és az interaktív VR alapú oktatáson részt vett hallgatók eredménye itt is hasonló volt. Az időbeli értékek kb. 10-15%-kal voltak jobbak az interaktív oktatáson, mint a 360°-os videó alapú oktatási csoporthoz képest, ami annak az indikátora, hogy a résztvevők az interaktív oktatásnak köszönhetően, nagyobb magabiztossággal tudták elvégezni a feladatokat, és emlékeztek a veszélyzónákra is. Ezzel szemben a tantermi oktatásos csoport átlagértékei az összehasonlított útvonalak eltérésében és az időértékében is jelentősen eltértek az optimálistól. Számos nagymértékben kilengő értéket kaptunk, amelyek valós helyzetben akár súlyos balesetet is jelenthetnek.

Az eredményeket számos módon összehasonlítva kijelenthető, hogy a VR alapú oktatás valóban hatékonyan támogatja a helyszíni balesetmegelőzést, akár a mindennapi átlagos munkavégzés során is.

1. TÁBLÁZAT: A mért időértékek összehasonlítása

	tantermi oktatás		360°-os videós oktatás		interaktív VR oktatás	
	teszt-pályán töltött idő [s]	veszélyzónában töltött idő [s]	teszt-pályán töltött idő [s]	veszélyzónában töltött idő [s]	teszt-pályán töltött idő [s]	veszélyzónában töltött idő [s]
1.	61,70	36,89	53,61	19,22	43,43	4,53
2.	45,32	30,59	46,44	38,30	48,64	27,89
3.	51,42	25,69	71,78	15,15	48,02	12,54
4.	66,18	27,61	54,93	26,31	53,72	12,83
5.	41,43	39,43	45,20	16,86	49,41	4,32
6.	45,89	34,34	62,87	43,31	55,73	12,44
7.	68,93	34,88	57,91	21,41	48,59	11,47
8.	63,82	34,40	52,06	16,13	44,28	10,77
9.	72,79	33,28	41,49	17,47	53,26	13,12
10.	83,05	39,80	59,11	34,15	43,56	9,37
11.	64,53	32,11	60,48	39,14	56,20	10,93
12.	62,42	42,63	49,60	22,38	48,10	8,42
átlag	60,62	34,30	54,62	25,82	49,41	11,55



6. ÁBRA: Útvonalelemzés és összehasonlítás

5. | ÖSSZEZÉS

A kutatás eredményei egyértelműen alátámasztják a digitalizált megoldások alkalmazásának hatékonyságát. A vizsgált virtuális valóság megoldások hasznos lehetőségnek bizonyultak. A BIM modellek elterjedésével a VR alapú megoldások elkészítése nem igényel sok többlet erőforrást, ezáltal a BIM modell biztonsági célú hasznosítása mindenképp pozitív előnyökkel járhat. A kutatás során elemzett hagyományos, interaktív VR és a 360°-os VR videó alapú oktatás elemzése alapján kijelenthető, hogy a felsorolt digitális megoldások jóval hatékonyabb megoldást jelentenek a hagyományos terv alapú kommunikációhoz képest, így ezek jövőbeni alkalmazását javasoljuk.

A virtuális valóság balesetvédelmi szempontú alkalmazása egy innovatív terület, ami egy kifejezetten hasznos célt, az emberi élet védelmét állítja a fókuszba. A technológia fejlődésével képesek leszünk olyan virtuális szimulációk készítésére, amelyek a kivitelezés legtöbb veszélyes szituációjára felkészíthetik a munkavállalókat. Jelen kutatás bizonyítja a technológia hasznosságát, így a további kutatások is valószínűsíthetően megfelelő eredményességgel bírhatnak. Tervezzük a cikkben részletezett tesztek elvégzését tényleges építőipari munkavállalók körében is elvégezni. Ettől függetlenül javasoljuk a technológia akár azonnali kivitelezők általi alkalmazását, hiszen hasznossága bizonyított és előnyökkel járhat.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munkát a PTE MIK Huawei SEEDs Kiválósági Ösztöndíj támogatta, a pályamunka a Huawei Technologies Hungary Kft. támogatásával készült. Ezúton szeretnék továbbá köszönetet nyilvánítani mentoromnak, dr. Rák Olivérnek, a Pécsi Tudományegyetemnek, és a BIM Skills Lab kutatócsoport tagjainak a rengeteg segítségért és támogatásért.



IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Bakai Nándor, Mäder Patrik Márk, Horkai András, Etlinger József, Rák Olivér, Cebei Márk Dániel, Zagorác Márk Balázs: Az építőipari munkabalesetek megelőzésére és csökkentésére irányuló beavatkozási területek – statisztikai adatelemzéssel történő – meghatározása. Magyar Építőipar, 2021(3-4), 90-99, <https://doi.org/10.1768/MEIP.2021.70.90>
- [2] Balint Lampert, Attila Pongracz, Judit Sipos, Adel Vehrer, Ildiko Horvath: MaxWhere VR-learning improves effectiveness over classic tools of e-learning, Acta Polytechnica Hungarica (2018) 15(3), 125-147. https://acta.uni-obuda.hu/Lampert_Pongracz_Sipos_Vehrer_Horvath_82.pdf
- [3] Baranyainé Kóczy Judit, Komlósi László Imre: A tanulás, mint interaktív cselekvés: paradigma váltás a VR technológia segítségével. JEL-KÉP, kommunikáció, közvélemény, média, 2018/4. szám, <https://doi.org/10.20520/JEL-KEP.2018.4.109>
- [4] Kuttner Ádám: AR és VR technológia oktatási felhasználási lehetőségei a kiállítási kommunikációban. Iskolakultúra 32(2), 83-94, [2022], <https://www.iskolakultura.hu/index.php/iskolakultura/article/view/39884>
- [5] K. G. Ahmed: Integrating VR-enabled BIM in building design studios, architectural engineering program, UAEU: A pilot study. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirates, 2020, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ASET48392.2020.9118308>
- [6] Lee, S. J., Reeves, T. C., Edgar Dale: A significant contributor to the field of educational technology. Educational Technology (2007), 47(6), pp. 56-59.
- [7] Fan Yang, Yang Miang Goh: VR and MR technology for safety management education: An authentic learning approach. Safety Science 148 (2022), 105645, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105645>
- [8] Checa, D., Bustillo, A.: A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training. Multimed Tools Appl 79, 5501-5527, [2020], <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08348-9>
- [9] Kanade, S. G., Duffy, V. G.: Use of virtual reality for safety training: A systematic review. In: Duffy, V. G. (eds.) Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Health, Operations Management, and Design. HCI 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol. 13320. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06018-2_25
- [10] Xiao Li, Wen Yi, Hung-Lin Chi, Xiangyu Wang, Albert P. C. Chan: A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. Automation in Construction (2017) 86, 150-162, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.003>
- [11] Dong Zhao, Jason Lucas: Virtual reality simulation for construction safety promotion. International Journal of Injury Control and Safety Promotion (2014), 22(1), 57-67, <https://doi.org/10.1080/17457300.2013.861853>
- [12] Krantiraditya Dhalmahapatra, J. Maiti, O. B. Krishna: Assessment of virtual reality based safety training simulator for electric overhead crane operations, Safety Science 139 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105241>
- [13] Pooya Adami, Patrick B. Rodrigues, Peter J. Woods, Burcin Becerik-Gerber, Lucio Soibelman, Yasemin Copur-Gencturk, Gale Lucas: Effectiveness of VR-based training on improving construction workers' knowledge, skills, and safety behavior in robotic teleoperation. Advanced Engineering Informatics (2021) 50, 101431, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101431>