

Additív gyártás integrálása az oktatásba az Ipar 4.0 és Minőség 4.0 szemléletében

Integrating additive manufacturing into education from the perspectives of Industry 4.0 and Quality 4.0

Hopka Brigitta*, Dr. habil. Farkas Gabriella*

* Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
hopkabrigitta@gmail.com, farkas.gabriella@bkgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — Az additív gyártási technológiák, különösen a 3D-nyomatás, elengedhetetlenek az Ipar 4.0 és a Minőség 4.0 keretrendszereknek megfelelő projektalapú műszaki oktatás elősegítéséhez. A tanulmány központi eleme egy felügyelet nélküli működésre tervezett, 3D nyomtatás számára kialakított nyílt laboratórium koncepciójának bemutatása, amely kifejezetten a hallgatók önállóságának, az együttműködésen alapuló tanulásnak és a digitális kompetenciák fejlesztésének elősegítését célozza. A kutatás során felmérést végeztünk a hallgatói elvárásokról, amelynek eredményei alapján funkcionális, informatikai és szervezeti javaslatokat határoztunk meg. A laboratórium biztonságos működésének értékeléséhez három kockázatelemzési módszert – GYELV-elemzést, kockázati mátrixot és csokornyakkendő elemzést – alkalmaztunk. Az elemzés rávilágított a legkritikusabb műszaki, elektromos, munkavédelmi, informatikai és felhasználói veszélyekre, valamint azok enyhítésére és ellenőrzésére szolgáló stratégiákra. Az eredmények azt mutatják, hogy a felügyelet nélküli 3D nyomtató laboratórium nem alacsony kockázatú környezet, azonban megfelelő ellenőrzések és technikai segítségnyújtás mellett biztonságosan üzemeltethető. A kutatás kihangsúlyozza, hogy a digitalizáció, az érzékelőhálózatok, a távfelügyelet és az adatközpontú működés alkalmazása jelentősen javítja a laboratórium megbízhatóságát. A javasolt modell megfelel az Ipar 4.0 és a Minőség 4.0 követelményeinek, és kiválóan alkalmas a projektalapú műszaki felsőoktatásra.

Kulcsszavak: additív gyártás, szabadlabor, biztonság, kockázatfelmérés

Abstract — Additive manufacturing technologies, especially 3D printing, are essential for promoting project-based engineering education compliant with Industry 4.0 and Quality 4.0 frameworks. The central focus of this article is the presentation of a concept for an open laboratory designed for 3D printing and intended for supervision-free operation, which specifically aims to promote student autonomy, collaborative learning, and the development of digital competencies. During the research, we conducted a survey on student expectations, and based on the results, we identified functional, IT, and organizational recommendations. To assess the safe operation of the laboratory, we applied three risk analysis methods: SWOT analysis, a risk matrix, and a bow-tie analysis. The analysis highlighted the most critical technical, electrical, occupational safety, IT, and user hazards, as well as strategies for reducing and controlling them. The results show that an

unattended 3D printing laboratory is not a low-risk environment; however, it can be operated safely with appropriate controls and technical support. The research emphasizes that the use of digitalization, sensor networks, remote monitoring, and data-driven operations significantly improves the reliability of the laboratory. The proposed model meets the requirements of Industry 4.0 and Quality 4.0 and is well-suited for project-based technical higher education.

Keywords: additive manufacturing, open lab, safety, risk assessment

1 BEVEZETÉS

Az additív gyártási technológiák napjainkban egyre nagyobb teret hódítanak, hiszen gyorsabb, rugalmasabb és gazdaságosabb termelést tesznek lehetővé. Azonban nem csak a termelő területen, hanem az oktatásban is, különösen a projektalapú szemléletet megvalósító műszaki képzések területén is jelentős szerepük van. Az additív technológiák az ISO/ASTM 52900:2021 szabvány szerinti megfogalmazásában: „az anyagok összekapcsolásának folyamata alkatrészek előállítására 3D-s modellek adatai alapján, általában rétegenként, szemben a szubtraktív gyártási és formáló gyártási módszerekkel” [1]. Ez a technológia az utóbbi évtizedekben rendkívül gyors fejlődési folyamaton ment keresztül, mára széles ipari környezetben alkalmazzák, úgymint az autógyártásban, a repülőgépiparban, az elektronikában, az orvostudományban stb. [2]. A 3D nyomtatás – amely tulajdonképpen a rétegről rétegre történő anyagfelépítés – előnyei között említendő, hogy:

- gyors prototípus gyártásra alkalmas módszer,
- bonyolult geometriájú termékek előállítására is alkalmazható,
- testre szabható,
- anyagtakarékos,
- kisebb szerszámgéppel rendelkezik.

Az ilyen típusú gyártás digitalizálható, ezért támogatja az intelligens termelést [1].

1.1 Az Ipar 4.0 kapcsolata a projektalapú oktatással

Az Ipar 4.0 egyik jelentős törekvése a digitalizáció, az automatizálás és az intelligens rendszerek integrálása a gyártásba. Ennek jelentősége főként a gyorsabb, hatékonyabb, optimalizált gyártás, mely által nem csupán a piac változó igényeire adott gyors reakció valósítható meg, hanem csökkenő selejtráta érhető el a költséghatékony gyártás

által. Ezzel párhuzamosan a Quality 4.0 célja, hasonlóan az Ipar 4.0-hoz, az automatizálás és a digitalizálás a minőségmenedzsment szempontjából. Folyamatos monitorozással adatvezérelt minőségirányítás építhető ki. A minőség és a karbantartás prediktív jellege pedig segít a hatékonyabb termelésben. A két fejlesztési irány közös célja a magasabb minőség elérése kisebb hibaarány és alacsony költségek mellett.

Az Ipar 4.0 és a Quality 4.0 fejlesztésének egyik közös és hasznos eszköze a projektalapú oktatás, főleg a műszaki képzések területén. A PBL (*Project Based Learning*, projekt alapú oktatás) központjában a probléma áll. A problémával kapcsolatban minden vonatkozást vizsgálunk, komplex elméleti és gyakorlati szinten, és akár valós élethelyzetekben is. Együttműködésen és kommunikáción alapuló közös tevékenység, mely végigkíséri a tervezés és döntés folyamatát, ezzel a projekten dolgozók kritikus gondolkodását fejlesztve. A módszer a források széles tárházának használatával, korlátok nélkül teszi lehetővé a projektcsapat közös munkáját. A PBL megfelelő alkalmazásával nemcsak a tanulási eredmények javíthatók, hanem a hallgatók motivációja és a problémamegoldó képessége is. [3]

A PBL-lel kapcsolatos kutatások alapvetően hat jellemzőjét emelik ki, ezek: a motiváció, a tanulási célokra való összpontosítás, az oktatási tevékenységekben való részvétel, a diákok közötti együttműködés, a támogató technológiák használata és a kézzelfogható termékek létrehozása. Az oktatók általában támogatóként vesznek részt ebben az oktatási formában azzal a céllal, hogy visszajelzést és támogatást nyújtanak a hallgatóknak, hatékonyítják a tanulási folyamatukat. Mindezen jellemzők közül kiemelendő a valós kihívásokat megoldó projekt-szemlélet, ami alapvetően megkülönbözteti a PBL-t más tanulóközpontú pedagógiai módszerektől, mint például a problémamegoldáson alapuló tanulástól. [4][5]

Az Ipar 4.0 és a PBL közös célja a valós problémákra építkezve fejlődő hatékonyság és adaptív működés, melyek az elvárásokon alapuló megvalósítás és gyártás elvárásainak alapjául szolgálhat. A műszaki felsőoktatásban mindezek alapján különösen nagy jelentősége van olyan infrastrukturális háttér létrehozásának, amelyben megvalósíthatók ezek a módszerek.

1.2 A 3D nyomtatás

Az additív gyártástechnológia, ezen belül a 3D nyomtatás Intézményünkben számos területen megtalálható, a hallgatók rendelkezésére álló laborban több típusú nyomtatót tesztelhetik, tanulmányozhatják ezt a modern technológiát. Fontos megemlíteni, hogy a 3D nyomtatás mögött összetett eszköz- és informatikai rendszer áll. A digitális 3D modellből a nyomtatás során fizikai termék készül, de a megvalósulásához számos fizikai-mechanikai és informatikai tényező játszik még közre.

A mechanikai rendszerhez mozgásvezérlés csatlakozik, a munkatérben a nyomtatás 3 tengelyen (x -, y -, z -) történik, melyek pontosságát a lineáris vezetékek, motorok, szíjhajtások, orsók és pozicionáló berendezések biztosítják. A minőséget ezen a ponton a felületi minőségből, méretpontosságából és a folyamat megismételhetőségéből mérjük fel. Az anyagadagoló rendszer és extruder szerepe nem csupán a filament hotendhez történő adagolása, hanem beállításaitól függően biztosíthatja a felépülő rétegek egyenletességét és a termék geometriai pontosságát. A tárgyasztal, másnéven építőtér stabil, sík asztal, mely technológiától függően akár fűthető is lehet. Az elektronikai vezérlőegységhez számos

érzékelő csatlakozik, például a hőmérsékletet, anyagjelentést figyelik, vannak köztük végállás kapcsolók és szintező szenzorok is. Az elektronikai vezérlőegységben történik a digitális utasítások mechanikai művelettel alakítása [6].

Az alapanyagok és az eljárásváltozatok tekintetében széles paletta áll rendelkezésre a kutatási-gyártási terület igényeihez, termékeihez igazodva:

- FDM/FFF (*Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication*): Szálhúzásos 3D nyomtatás filamentből. Az alkalmazott filament anyaga valamilyen hőre lágyuló műanyagból [7,8], amely lehet például

- PLA (Politejsav): biológiai eredetű, megújuló forrásból előállítható polimer, alacsony hőmérsékleten is jól alakítható, kismértékű zsugorodás mellett. Jó felületi minőséggel rendelkező termékek állíthatók elő belőle, így az oktatási modellek esetében gyakori eljárás. Hátrányaként említhető, hogy ridegebb anyag, hőállósága és ütésállósága alacsonyabb.
- ABS (Akrilnitril-butadién-stirol): ütésállósága, hőállóság és szívóssága okán funkcionális alkatrészek, burkolatok, gépelemek és igénybevett szerkezeti elemek gyártására alkalmas alapanyag. Fontos megemlíteni, hogy nehezebben nyomtatható, hiszen vetemedésre hajlamos, így fűtött tárgyasztalra/zárt nyomtatótérre van szükség.
- PETG (Polietilén-tereftalát-glikol): a jó nyomtathatóságot és a kedvező mechanikai tulajdonságokat ötvözi. Jó szívósság/ellenállás, ütésállóság és rétegtapadás jellemzi, kisebb az esélye, azonban hajlamos szálhúzóásra.

- SLA (*Stereolithography*), műgyanta nyomtatás: folyékony polimert, műgyantát UV fényrel rétegről rétegre megszilárdítanak.

- SLM/DMLS (*Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering*): por alapú nyomtatás, melynek során nem nyomtatószálból, hanem porrétegekből építi fel a tárgyakat.

- Binder Jetting: a por alapú anyaghoz kötőanyagot is adagol.

- PolyJet: precíziós eljárás, mely során több anyag is adagolható egyidejűleg.

A tervezés CAD (Computer-Aided Design) szoftverben történik, ez képezi a gyártás alapját. A megfelelő fájlformátum kiválasztása (leginkább használt kiterjesztés: STL-Standard Tessellation Language) után a modellt egy szeletelő (*slicer*) szoftverbe tápláljuk. A szoftver vízszintes rétegekre bontja a modellt, itt állíthatjuk be a bejárando útvonalat, sebességet, rétegvastagságot, kitöltési logikát stb. A G-kódot a firmware és a gépkezelő logika alakítja át és értelmezi a nyomtatófej mozgásának pályáját, sebességét, hőmérsékletet, anyagadagolást, műveleteket. Az adatátvitel a hagyományos USB vagy memóriakártya mellett megoldható hálózati vagy felhőalapú, digitalizált módszerrel is [6]. Ez a megoldás biztosítja, hogy a folyamat távolról is vezérelhető, felügyelhető legyen. Kapcsolat épülhet ki a hálózatban található más berendezésekkel, rendszerbe integrálhatóvá válik a nyomtatás, ezzel az Ipar 4.0 egyik jelentős törekvésének téve eleget. Lehetővé válik a folyamat monitorozása és a digitális ellenőrzése is, így a nyomtatási állapot ellenőrzése, a szenzoradatok gyűjtése, hibadetektálás és ez által az adataalapú minőségbiztosítás is megvalósítható, így eleget téve a Quality 4.0 céljának.

2 A PBL MEGVALÓSÍTÁSÁT TÁMOGATÓ ADDITÍV GYÁRTÁS KONCEPCIÓJA

Tanulmányunkban szeretnénk ismertetni egy felügyelet nélkül működő 3D nyomtató szabadlabor megvalósításának koncepcióját, továbbá annak biztonsági kockázatainak felmérését és elemzését. A tervezés során figyelembe vett szempontok:

- a projekt alapú oktatás támogatása,
- a laborban lévő eszközök, berendezések megóvása,
- a felhasználók biztonságának megóvása,
- a nyomonkövethetőség megvalósítása,
- a labor szabad alkalmazásának kialakítása.

Ennek érdekében felmérést készítettünk a hallgatók körében, melynek célja elsősorban az elvárások összegyűjtése volt. A projektalapú oktatásban népszerű és hasznos eszköz, a 635-módszer segítségével a hallgatók ötleteket gyűjtöttek.

A 635 egy kreatív, gyors módja az ötletelésnek, mely során a csapat tagjai egyenlő szerepet kapnak. Bernd Rohrbach 1968-ban alakította ki ezt a hatékony módszert a brainstorming igazán aktívvá tétele érdekében. Egy csapat 6 főt jelent, fejenként 3 ötlet hozzáadásával, egy kör csupán 5 perc; következő körökben egymás ötleteinek továbbfejlesztése is lehetséges, így csupán 30 perc alatt akár 108 ötlet is születhet [9].

A hallgatók által meghatározott elvárások a következőképpen foglalhatók össze. Az első pont a szabadlabor használatára irányuló jogosulatlan belépés, felhasználás elkerülésére irányult. Ennek érdekében a labor használatához előzetes vizsgával egybekötött képzés elvégzése szükséges, hogy a felhasználó megkapja az alap tudást, melyet aztán egy – akár szabadon választható – kurzus kereteiben bővíthetik az érdeklődők. A második pontban egy beléptető rendszer kiépítésével ellenőrizhetővé válna, hogy ki és mikor tartózkodik a laborban. Harmadik pontban a hibázási lehetőségek csökkentése érdekében használati útmutatók, oktató videók készülhetnek a különböző típusú nyomtatóinkhoz, melyeket a géphez dedikált QR-kód beolvasásával elérhetnek a felhasználók.

A hibák kiküszöbölésére és a labor gördülékeny működésére és használatára informatikai oldalról is születtek ötletek: egy weboldal fejlesztése, melyen időpont foglalási rendszer működne, számolva a gyártani kívánt modell nyomtatási idejével. A megfelelő gép és anyag típus kiválasztására alkalmas szoftver kifejlesztése is a hosszabb távú tervek között szerepel, így törekedve a lehető legkevesebb hibára és selejtre, ezzel egyidejűleg pedig egy alapanyag nyilvántartás is létrejönne. A felhasználói felületen hiba/veszélybejelentő modul segítené a felmerülő problémák megoldását a lehető leghamarabb, a laborral kapcsolatban naprakész információk állnának az üzemeltetők és a dedikált karbantartó munkatárs rendelkezésére. Kiaknázva az Ipar 4.0 alappilléreit felhő szolgáltatás használata vezethető be, melyben a gyártandó modelleket a kurzus vezetője ellenőrizheti, a szimulációs szoftver pedig biztosíthatná a tervezőt a nyomtatás sikerességéről, akárcsak egy CAM- szoftver.

A szabadlabor szabályainak fenntartása és a biztonságos működés kamerarendszer kiépítésével válna ellenőrizhetővé.

3 A BIZTONSÁGI KOCKÁZATOK FELMÉRÉSE ÉS ELEMZÉSE

A hallgatók számos remek elvárást fogalmaztak meg mind a szabadlabor biztonságával, működtetésével, mind az informatikai háttérrel kapcsolatban, azonban ezeket biztonság és megvalósíthatóság szempontjából kockázattertelési módszerekkel is szükséges elemezni. A megvalósítás előtt tehát érdemes a felügyelet nélkül működő labor esetén felmerülő veszélyek kockázatát, gyakoriságát, súlyosságát felmérni, illetve értékelni, majd megelőző, kárcsökkentő intézkedéseket hozni. Hiszen nem csupán előnyöket rejt magában ez a lehetőség, de számos üzemeltetési, műszaki, biztonsági, minőségügyi és emberi tényezőtől eredő kockázatot is hordoznak.

A kockázatterteléshez három minőségbiztosítási módszer került kiválasztásra: a SWOT-analízis, a csokornyakendő-módszer és a kockázati mátrix. E három eszköz együttes használata lehetővé teszi, hogy a vizsgálat ne csupán az egyes veszélyforrások azonosítására korlátozódjon, hanem azok stratégiai, ok-okozati és súlyossági szempontból is értékelhetők legyenek. Mindhárom eljárás jól illeszkedik az IEC 31010:2019 kockázatelemzési szabványhoz, elvárásaihoz és keretrendszeréhez.

Vizsgálati szempontok:

- műszaki és berendezésbiztonság,
- villamos és tűzvédelmi kockázatok,
- egészségügyi és környezeti hatások,
- minőségügyi és gyártásstabilitási problémák,
- informatikai hálózat kockázatai,
- emberi tényezőtől fakadó hibák.

Az 1. táblázat összefoglalja azokat a kockázati tényezőket, melyek a leginkább veszélyeztetik a szabadlabort, a benne található eszközöket, berendezéseket (3D nyomtatókat), és legfőképpen a benne dolgozó kollégákat, hallgatókat, felhasználókat. Ezek azok a veszélyek, melyeknek bekövetkezése a gyakorlati tapasztalatok alapján a legnagyobb valószínűséggel megtörténhetnek. A tűzveszély a labor egyik legjelentősebb kockázata, amelyet elsősorban az elektromos és hőtermelő elemek meghibásodása okozhat. A túlmelegedés, rövidzárlat vagy sérült kábelezés különösen veszélyes felügyelet nélküli üzemelés esetén. A kockázatok hatékonyan csökkenthetők rendszeres karbantartással, érzékelőkkel támogatott felügyelettel és megfelelő tűzvédelmi eszközök alkalmazásával. A műszaki intézkedések mellett a jól kidolgozott tűzvédelmi protokoll és a felhasználók oktatása kulcsszerepet játszik a biztonságos laborüzemeltetésben.

Az elektromos veszélyek a 3D nyomtató laborban elsősorban a tápegység, a motorok, a fűtőelemek, a vezérlőegységek és a szenzorok meghibásodásából eredhetnek, amelyek rövidzárlatot, túlterhelést vagy túlmelegedést okozhatnak. Ezek a hibák nemcsak az eszközök károsodásához, hanem az elektromos rendszer meghibásodásához is vezethetnek, különösen folyamatos vagy felügyelet nélküli működés esetén. A kockázatok csökkentése érdekében elengedhetetlen a rendszeres műszaki karbantartás, az állapotfelmérés és az elektromos biztonság folyamatos ellenőrzése. A megfelelő tűzvédelmi infrastruktúra, a nem éghető felületek alkalmazása, valamint a dokumentált protokollok és oktatás együttesen biztosítják a labor biztonságos üzemeltetését.

1. táblázat. Veszélyforrások és megelőző tevékenységek

Veszélytípus	Okok	Megelőzés
Tűz	Túlmelegedő fűtőszál vagy hotend Hibásan fűtött tárgyasztal Rövidzárlat Sérült kábelek Hibás ventilátor miatti túlhevülés	Rendszeres karbantartás és állapotfelmérés Tűz-és füstjelző rendszer Nem éghető felületekre történő nyomtató telepítés Tűzoltó készülék Tűzvédelmi protokoll és oktatás
Elektromos veszély	Tápegység, motor, fűtőelem, vezérlőegység, szenzorok meghibásodása okozta rövidzárlat, túlterhelés, kontakthiba, túlmelegedés	Rendszeres érintésvédelmi és vilamos ellenőrzés Kábelek mechanikai védelme (kábelcsatornák, kábel elvezetők) Túlfeszültségvédelem, kismegszakító
Levegőminőség és eü. kockázatok	Ultrafinom részecskék, finom por Illékony vegyületek Műgyanta párolgása okozta irritáció, toxikus anyagok	Megfelelő szellőztetés, elszívó berendezés Zárt nyomtatótér Elérhetővé tett MSDS dokumentumok Megfelelő hulladékkezelés
Mechanikai- és berendezésbiztonság	Beszorulás, törés, nyomtatófej ütközés, hibás mozgó alkatrész okozta túlmelegedés, anyagfelhalmozódás	Rendszeres karbantartás és a kopóalkatrészek tervezett cseréje Távoli leállítási lehetőség Kamerás felügyelet a nyomtatótérben
Nyomatási hibák	Vetemedés, rétegeltolódás Filament elakadás Nozzle clog (nyomtatófej) eltömődés	Tárgyasztal szintezés Alapanyagjelentés szenzor Próba és tesztüzem Kamerás felügyelet a nyomtatótérben
Informatikai- és hálózatbiztonság	Távoli vezérlés hibája Hálózati kapcsolat megszakadása Hibásan generált G-kód Szoftver vagy firmware hiba Adatvesztés	Kontrollált felhasználói jogosultság Szoftverfrissítések Engedélyezett fájlok nyomtatása Biztonságos távoli elérés
Emberi tényező	Rossz alapanyag használata Hibás szeletelő-szoftver beállítások Helytelen tisztítás Labor fegyelmegsértése	Működési szabályzat Jogosultság a labor használatához Checklist/ 5S Laborprotokoll Használati utasítások, munkautasítások elérhető helyen

A 3D nyomtatás során keletkező ultrafinom részecskék, finom porok és illékony vegyületek jelentős levegőminőségi és egészségügyi kockázatot jelenthetnek, különösen zárt térben és huzamosabb működés esetén. A műgyanta párolgásából származó irritáló vagy toxikus anyagok fokozottan veszélyeztethetik a felhasználók légzőrendszerét. A kockázatok hatékonyan csökkenthetők megfelelő szellőztetéssel, elszívó berendezések alkalmazásával és zárt nyomtatótérek kialakításával. Az MSDS dokumentumok hozzáférhetősége és a szabályozott hulladékkezelés tovább növeli a labor biztonságos és egészség tudatos működését.

A berendezésekkel kapcsolatos kockázatok közé tartoznak a mozgó alkatrészek által okozott beszorulások, törések, a nyomtatófej ütközései, valamint a meghibásodott mechanikai elemek miatti túlmelegedés és anyagfelhalmozódás. Ezek a problémák nemcsak a berendezések állapotát veszélyeztetik, hanem a felhasználók biztonságát is, különösen felügyelet nélküli üzem esetén. A kockázatok csökkenthetők rendszeres karbantartással és a kopó alkatrészek tervezett cseréjével. A távoli leállítási lehetőség és a nyomtatótér kamerás felügyelete lehetővé teszi a gyors beavatkozást és növeli az üzembiztonságot.

A nyomtatási hibák, mint a vetemedés, a rétegeltolódás, a filament elakadása vagy a nyomtatófej eltömődése jelentősen ronthatják a kész darab minőségét és növelik az anyag- és idővesztéseket. Ezek a problémák gyakran a nem megfelelő beállításokra, alapanyag-ellátásra vagy mechanikai instabilitásra vezethetők vissza. A megelőzés érdekében kulcsfontosságú a tárgyasztal pontos szintezése, az alapanyagjelentés-szenzor alkalmazása, valamint a nyomtatások előtti próba- és tesztüzem. A nyomtatótér kamerás felügyelete lehetővé teszi a hibák korai felismerését és a gyors beavatkozást, ezáltal növelve a nyomtatási folyamat megbízhatóságát.

Az informatikai problémák a 3D nyomtató labor működésében elsősorban a távoli vezérlés hibáiból, hálózati kapcsolat megszakadásából, illetve hibásan generált G-kódból vagy szoftveres, firmware-es meghibásodásokból eredhetnek. Ezek a nyomtatási folyamat megszakadásához, hibás gyártáshoz vagy adatvesztéshez vezethetnek, különösen több felhasználót kiszolgáló, automatizált környezetben. A kockázatok csökkenthetők kontrollált felhasználói jogosultsági rendszer alkalmazásával és a rendszeres szoftverfrissítések biztosításával. Az engedélyezett fájlok nyomtatása és a biztonságos távoli elérés kialakítása hozzájárul az informatikailag stabil és megbízható laborüzemeltetéshez.

A felhasználói kockázatok a 3D nyomtató laborban elsősorban a nem megfelelő alapanyag használatából, hibás szeletelési beállításokból, helytelen tisztításból és a laborfegyelmegsértéséből adódnak. Ezek a problémák nemcsak a nyomtatás minőségét rontják, hanem berendezéskárosodáshoz és biztonsági kockázatokhoz is vezethetnek. A megelőzés kulcsa az egyértelmű működési és laborprotokollok kidolgozása, valamint a laborhasználat jogosultságához kötése. A jól látható használati utasítások, munkautasítások és az ellenőrző lista/5S szemlélet alkalmazása jelentősen csökkenti a hibák és mulasztások előfordulását. A SWOT-analízis jelentősége, hogy a külső és belső tényezőket egyaránt figyelembe vesszük, tehát teljeskörű felmérést és elemzést tesz lehetővé. A módszer egy mozaikszó, utalva az erősségekre (*strengths*), gyengeségekre (*weaknesses*), lehetőségekre (*opportunities*) és veszélyekre (*threats*).

ats). A belső tényezők az erősségek és gyengeségek, melyekre építkezni kell, vagy fejleszteni szükséges azokat [10].

ERŐSSÉGEK <ul style="list-style-type: none"> Folyamatosan működő nyomtatás, gyártás felügyelet nélkül Rugalmas lehetőségek, gyors prototípus gyártás Több folyamat egyidejű, párhuzamos működése Remek lehetőség a kutatás-fejlesztés és oktatás területén Monitorozhatóság Időhatékony 	GYENGESÉGEK <ul style="list-style-type: none"> A felügyelet hiánya növelheti a hibák kockázatát Előfordulhat a hibák észlelésének késése Rendszeres karbantartás és kalibrálás szükséges a minőségi hibák kiküszöbölésére Anyagelakadás, vetemedés vagy tapadási probléma késői észlelése Hibás fájlok, téves beállítások valószínűsége, nagyobb hatása
LEHETŐSÉGEK <ul style="list-style-type: none"> Távoli felügyelet kiépítése Szenzorok beépítése, automatizált megoldások Ipar 4.0 és Quality 4.0 rendszerek Adatalapú hibamegelőzés és prediktív karbantartás Optimalizált laborizemeltetés Oktatási innovációs projektek és önálló hallgatói munka támogatása 	VESZÉLYEK <ul style="list-style-type: none"> Tűz-és túlmelegedés kockázata Elektromos hibák EÜ kockázatok (káros poranyag belélegzés, illékony vegyületek) Adatvesztés, hiba a vezérlésben Berendezés hibái, laborállás Emberi mulasztások lehetősége

1. ábra. A SWOT-analízis eredményei

Az elkészített elemzés alapján elmondható (1. ábra), hogy a 3D nyomtató labor működése jelentős szakmai és oktatási potenciállal rendelkezik. Az erősségek között kiemelkedik a folyamatos, felügyelet nélküli működés lehetősége, valamint a gyors és rugalmas prototípusgyártás, amely egyszerre támogatja a kutatás-fejlesztést és az oktatást. A párhuzamosan működtethető folyamatok és a jó monitorozhatóság magas időhatékonyt és kapacitáskihasználást tesznek lehetővé. Ugyanakkor a felügyelet hiánya növeli a hibák kialakulásának és késői észlelésének kockázatát, különösen anyagelakadások, vetemedés vagy rossz tapadás esetén. A rendszeres karbantartás és kalibrálás elengedhetetlen a minőségi problémák megelőzéséhez, míg a hibás fájlok vagy téves beállítások jelentős selejtet okozhatnak. A lehetőségek oldalon a távoli felügyelet, szenzorok és automatizált megoldások bevezetése, valamint az Ipar 4.0 és Quality 4.0 szemlélet alkalmazása jelentős fejlődési irányt kínál. Az adatalapú hibamegelőzés és a prediktív karbantartás hozzájárulhat a stabilabb és biztonságosabb üzemeltetéshez. A labor oktatási szerepe tovább erősíthető innovációs projektek és önálló hallgatói munkák támogatásával. A fő veszélyek közé tartoznak a tűz- és túlmelegedési kockázatok, az elektromos meghibásodások és

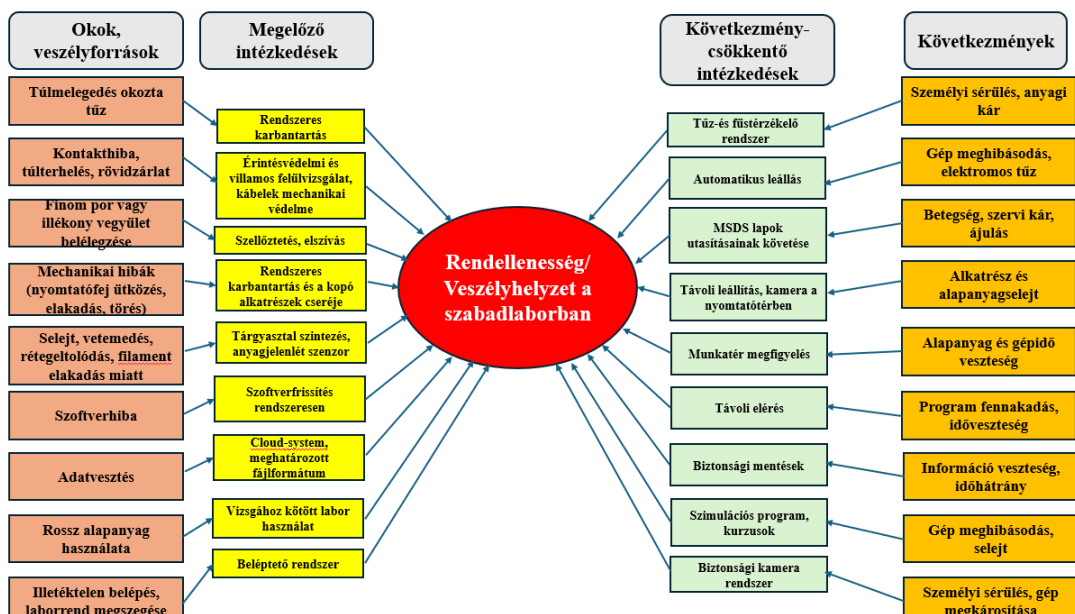
az egészségügyi ártalmak. Emellett az adatvesztés, a vezérlési hibák és az emberi mulasztások is jelentős kockázatot jelentenek. Összességében a labor nagy hozzáadott értéket képvisel, de a biztonságos és megbízható működéshez a technológiai fejlesztések és a kockázatkezelés tudatos erősítése elengedhetetlen.

A kockázati mátrix (2. ábra) segítségével két szempont szerint értékeltük a veszélyeket: a bekövetkezés valószínűsége és a következmény súlyossága. E két jellemző alapján priorizáltuk a kockázatokat és fogalmaztunk meg iránymutatást a beavatkozás jelentőségére. A valószínűséget és a súlyosságot 1-től 5-ig terjedő skálán pontoztuk, ezen pontszámok szorzatából kaptuk meg a kockázati értéket (kockázati szint) [11].

Veszély/Kockázat	Valószínűség	Súlyosság	Kockázati szint	Intézkedés
Túlmelegedés, hibás fűtésbeállítás okozta tűz	2	5	10 magas	Rendszeres karbantartás, Tűzoltókészülék, Tűz-és füstjelző rendszer, Nem éghető anyagból készült
Kontakthiba, rövidzárlat, túlterhelés, túlmelegedés	3	4	12 magas	Kábelek mechanikai védelme Rendszeres érintésvédelmi és villamos felülvizsgálat
Finom por vagy illékony vegyület belélegzése	4	4	16 kritikus	Megfelelő elszívás, szellőztetés kiépítése Zárt nyomtatóterület MSDS lapok közzététele
Mechanikai hibák (nyomtatófej ütközés, elakadás, törés)	4	2	8 közepes	Karbantartás és a kopó alkatrészek rendszeres cseréje Távoli leállítás Kamera felügyelet a nyomtatóterületen
Selejt, alapanyag-és gépidővesztéses vetemedés, rétegtelődés, filament elakadás miatt	4	2	8 közepes	Alapanyagjelentés szenzor Munkatér figyelő kamera Tárgyasztal szintezése
Távoli vezérlés vagy szoftverhiba	2	3	6 alacsony	Folyamatos szoftverfrissítés Biztonságos távoli elérés
Adatvesztés	2	4	8 közepes	Cloud system Csak engedélyezett fájlformátum
Rossz alapanyag	3	2	6 alacsony	Jogosultság vizsgálathoz köve Szimulációs szoftver Tudásbővítő kurzusok
Illetéktelen belépés, helytelen laborhasználat	4	3	12 magas	Kamera rendszer Beléptető rendszer
Helytelen tisztítás/takarítás hiánya	3	2	6 alacsony	SS bevezetése a laborba laborprotokoll közzététele

2. ábra. Kockázati mátrix, amely értékeli a lehetséges kockázatokat

Az elvégzett kockázatelemzés eredményeiben jól látszik, hogy több magas és kritikus kockázat is feltárható, melyek megelőzése és csökkentése elsődleges szempont a labor



3. ábra. Csokonyakkendő elemzés

biztonságos, folyamatos működtetéséhez. Magas kockázatok (10-16 pont) a biztonságos munkavégzéssel kapcsolatban jelentek meg, míg a közepes kockázati szintű (8-10 pont) veszélyek a berendezésekkel kapcsolatban értékelhetők. Az alacsony kockázatok (6-8 pont) többnyire a szakmai hozzáértés tekintetében azonosíthatók.

A csokornyakkendő-diagram (3. ábra) a felügyelet nélküli működő 3D nyomtató laborban történő nemkívánatos eseményeket szemlélteti [11][12]. Az elemzés átfogó és jól strukturált módon mutatja be a felügyelet nélküli 3D nyomtató laboratórium működésével kapcsolatos rendellenességek és veszélyhelyzetek teljes ok-következmény láncolatát.

Az ábra bal oldalán a kiváltó okok és a megelőző kontrollok, míg a jobb oldalon a lehetséges következmények és azok csökkentésére szolgáló intézkedések jelennek meg. A módszer jól alkalmazható a kapcsolódó kockázatok vizuális rendszerezésére és a kritikus beavatkozási pontok azonosítására. Az ábra szemléletesen mutatja az eddig kifejtett veszélyeket és azok következményeit. Az ellenintézkedéseket megelőző tevékenységre és következménycsökkentő tevékenységekre bontottuk.

Egyértelműen elkülöníti az okokat, a megelőző és következménycsökkentő intézkedéseket, valamint a lehetséges következményeket, így jól támogatja a rendszerszintű gondolkodást. Különösen értékes, hogy a műszaki, informatikai, munkavédelmi és felhasználói kockázatok egyaránt megjelennek, ami a labor valós működését tükrözi. Az elemzés eredményei alapján megállapítható, hogy a veszélyek jelentős része nem szüntethető meg teljesen, azonban megfelelő szervezési, technikai és digitális kontrollokkal kezelhető szintre csökkenthető. A digitális megoldások és az automatizált felügyelet hangsúlyos szerepe jól illeszkedik az Ipar 4.0 és Minőség 4.0 szemlélethez. Összességében az elemzés megbízható alapot nyújt a biztonságos üzemeltetési modell kialakításához és az oktatási célú alkalmazás megalapozásához.

4 KÖVETKEZTETÉSEK

A tudományos és műszaki háttér áttekintése után feltárt kockázatok és azoknak három módszer használatával történt átfogó elemzése és kiértékelése jól mutatja, hogy a 3D nyomtatásra tervezett szabadlabor létrehozása milyen előremutató, innovatív és hasznos lehetőségeket hordoz magában, hatékonysági és automatizálási lehetőségekkel, azonban minde mellett műszaki, biztonsági, minőségügyi és informatikai kockázatokat is hordoz. Az eredmények összegzése után megállapítható, hogy a felügyelet nélküli labor létrehozása és működtetése nem tekinthető alacsony kockázatú projektnak, de a megfelelő ellenőrzések mellett hatékonyan és biztonságosan működtethető.

A kutatás célja volt az is, hogy a felügyelet nélküli működő labor esetén felmerülő kockázatokat feltárjuk és elemezzük annak érdekében, hogy annak jövőbeni működése megbízható és biztonságos legyen. Az elvégzett elemzések alapján megállapítható, hogy a labor működtetéséhez nem elegendő a technológiai háttér, hanem többretnű megelőző és ellenőrző rendszer is szükséges. Elengedhetetlen a biztonsági funkciók kiépítése és a megbízható távoli felügyelet biztosítása, jogosultságok kezelése. Ezek összességében hatékonyan hozzájárulnak a munkabiztonsághoz és nyomomonkövetetőséghez. A vizsgált kockázatokat tekintve, amennyiben a kár és vész helyzetek megelőzésére előterjesztett javaslatok megvalósításra kerülnek a labor hatéko-

nyan integrálhatóvá válik az oktatási rendszerbe, a fejlesztési javaslatok bevezetésével a labor üzemeltetése jól illeszkedhet az Ipar 4.0 és a Quality 4.0 szemlélethez.

Olyan modern, intelligens felügyeleti rendszer létrehozására és annak vizsgálatára nyílnak lehetőségek, melynek része a mesterséges intelligencia alapú hibafelismerés, szenzorhálózat és kamerás képfeldolgozás, ezzel elősegítve az önellenőrzőképességét a laboroknak. A jövőbeni fejlesztések és kutatások várhatóan hozzájárulhatnak ahhoz, hogy ezek a laborok a korszerű, digitálisan támogatott és minőségorientált gyártási környezetek megbízható elemeivé váljanak.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary
- [2] M. R. Khosravani & T. Reinicke (2020): On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*, Volume 20, 100689, ISSN 2352-9407 <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689>
- [3] M. Sony, S. Naik (2020): Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 27 No. 7, 2213–2232. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>
- [4] P. Guo, N. Saab, L. S. Post, W. Admiraal (2020): A review of project-based learning in higher education: Student outcomes and measures. *International Journal of Educational Research*, Volume 102, 101586, ISSN 0883-0355 <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2020.101586>
- [5] Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991): Motivating Project-Based Learning: Sustaining the Doing, Supporting the Learning. *Educational Psychologist*, 26(3–4), 369–398. <https://doi.org/10.1080/00461520.1991.9653139>
- [6] P. Jain, T. Bhardwaj (2022): Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)*, Vol 9, Issue 7
- [7] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, M. I. Ul Haq (2022): 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, Volume 3, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- [8] D. Aciermo & A. Patti, Antonella (2023): Fused Deposition Modeling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties — An Overview. *Materials*, 16., 7664. <https://doi.org/10.3390/ma16247664>
- [9] Wang, TI., Chang, PC (2016): The Effect of 635 Brainstorming on the Creativity of Programming Design. In Wu, TT., Gennari, R., Huang, YM., Xie, H., Cao, Y. (eds) *Emerging Technologies for Education. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10108, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52836-6_6
- [10] R. Puyt & F. Lie & C. Wilderom, Celeste (2023): The origins of SWOT analysis. *Long Range Planning*, doi: 10.1016/j.lrp.2023.102304
- [11] ISO/IEC 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques
- [12] A. de Ruijter, F. Guldenmund (2016): The bowtie method: A review. *Safety Science*, Volume 88, 211–218. ISSN 0925-7535 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>