



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS
TÉZISFÜZETE

Marczis Attila

Fejlett számítógépes tomográfiai
technikák az additív gyártástechnológia
területén: torzuláscsökkentés és
dimenzionális mérések

Témavezető: Dr. Drégelyi-Kiss Ágota

ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI
ISKOLA

Budapest, 2026 július 8.

TARTALOMJEGYZÉK

1	A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI	2
2	CÉLKITŰZÉSEK	4
2.1	Szakirodalomban feltárt hiányosságok	4
2.2	A kutatás célkitűzései	5
2.3	Kutatási módszertan	6
3	VIZSGÁLATI MÓDSZEREK	9
3.1	Röntgen- és neutrontomográfia vizsgálata metrológiai szempontból	9
3.2	Röntgentomográfiával történő dimenzionális mérések vizsgálata két anyagból felépülő alkatrésznél	11
3.3	SLS technológia vizsgálata XCT-vel	14
4	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	17
5	IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA	22
6	TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK	27
7	TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK	29

1 A kutatás előzményei

Az additív gyártástechnológiák (AM) és a hibrid szerkezetek térnyerése jelentős kihívásokat támaszt a dimenzionális metrológiával szemben. A komplex belső csatornák és rejtett geometriák ellenőrzésére az ipari röntgentomográfia (XCT) vált az elsődleges, roncsolásmentes mérési eszközzé [1, 2, 3]. Az XCT metrológiai alkalmazásának legfőbb akadályát azonban a mérési eredmények visszavezethetőségének biztosítása és a mérési bizonytalanság pontos számszerűsítése jelenti [4, 5, 6].

A tomográfias mérés technika határainak bővítését a neutrontomográfia (NCT) metrológiai vizsgálata is elősegíti. A neutronsugárzás egyedülálló módon képes áthatolni a sűrű fémeken, miközben érzékeny a könnyű elemekre [7, 8]. Ugyanakkor a nemzetközi szakirodalomban hiányzott egy olyan kalibrált etalon és módszertan, amely lehetővé tette volna az XCT és NCT rendszerek dimenzionális mérési képességeinek közvetlen, objektív összehasonlítását.

A többanyagú (fém-polimer) összeállítások tomográfias mérése szintén kevésbé feltárt terület. Az alkatrészek érintkezési határfelületein kialakuló levegőrészek, valamint a komponensek

közötti jelentős sűrűségkülönbség olyan képi műtermékeket, mint a sugárkeményedés és szóródás, eredményeznek, amelyek szisztematikusan torzítják a felületmeghatározást [9, 10]. A szakirodalomban nem található olyan átfogó kutatás, amely a szkennelési paraméterek, a légrésméret és a képminőség (SNR, CNR) kölcsönhatásait számszerűsítette volna a mérési hibák tükrében [11, 12].

A szelektív lézeres szinterezéssel (SLS) gyártott polimer alkatrészek esetében a hőhatások okozta torzulások és zsugorodások jelentik a legnagyobb minőségi problémát. Bár a numerikus szimulációk széles körben elterjedtek, a mérésalapú, korrektív CAD-kompenzációs eljárások hatékonyságának [13], valamint a gyártótérbeli orientáció szisztematikus kapcsolatának részletes méréstechnikai és statisztikai elemzése még hiányzott. A disszertáció célja ezen elméleti és gyakorlati hiányosságok szisztematikus feltárása és megoldása.

2 Célkitűzések

Az AM és a többkomponensű alkatrészek térnyerése jelentős kihívásokat támaszt az ipari metrológiával szemben. A komplex belső geometriák pontos és roncsolásmentes mérésére az XCT bizonyult a legalkalmasabb eljárásnak [14], azonban alkalmazása során számos, a mérési pontosságot befolyásoló tényező még nem teljesen feltárt. A kutatás célja, hogy tudományosan megalapozott válaszokat adjon ezekre a kihívásokra.

2.1 Szakirodalomban feltárt hiányosságok

A releváns szakirodalom elemzése során három kulcsfontosságú hiányosság azonosítható. Az első a tomográfias rendszerek metrológiai összehasonlításának hiánya, mivel korábban nem létezett olyan kalibrált etalon és módszertan, amely lehetővé tette volna a neutron- és röntgentomográfias rendszerek mérési teljesítményének objektív összehasonlítását, figyelembe véve az eltérő anyagsugárzás kölcsönhatásokat [15, 16], valamint a neutronaktiváció utáni biztonságos kezelhetőséget [17, 18]. A második hiányosság a többanyagú összeállítások mérésére vonatkozik,

ugyanis nem volt szisztematikusan és kvantitatívan feltárva a különböző sűrűségű anyagok határfelületén fellépő képi műtermékek, valamint a komponensek közötti légrések együttes hatása a dimenzionális mérési hibák alakulására a különböző szkennelési paraméterek függvényében [19, 20]. A harmadik hiányosság az additív gyártott alkatrészek pontosságának optimalizálását érinti, mivel hiányzott egy olyan komplex, röntgentomográfias mérésekre épülő optimalizálási eljárás, amely a CAD-modell geometriai kompenzációját és a munkatérben való tudatos pozicionálást együttesen kezelve a gyártóberendezés rendszerszintű kalibrációs hibáit is korrigálja.

2.2 A kutatás célkitűzései

A feltárt hiányosságok alapján a kutatás az alábbi fő célkitűzéseket tűzi ki. Elsőként egy olyan új, a röntgen- és neutrontomográfias rendszerek összehasonlítására alkalmas kalibrációs fantom kidolgozása és validálása szükséges, amely mindkét eljárás számára megfelelő kontrasztot biztosít, miközben a neutronbesugárzás utáni alacsony aktivitása révén biztonságosan és ismételten használható. Második cél a tomográfias rendszerek összehasonlítására legalkalmasabb bizonytalanságszámítási módszer azonosítása, az NCT

rendszer kiterjesztett mérési bizonytalanságának meghatározása, valamint az NCT és az XCT metrológiai egyenértékűségének igazolása meghatározott mérési feladatoknál. Harmadik célkitűzésként a röntgentomográfias szkennelési paraméterek, így a voxelméret, a pixelegyesítés, az expozíciós idő és a forgatási mód hatásának szisztematikus vizsgálata szükséges a kontraszt-zaj és a jel-zaj viszonyra, valamint a mérési pontosságra egy- és többanyagú konfigurációkban. Negyedik cél annak igazolása, hogy a többanyagú elrendezés és a határfelületi légrések szignifikánsan növelik a mérési hibát, különösen az alacsonyabb sűrűségű polimernél, amely alapján iránymutatás dolgozható ki az optimális szkennelési paraméterek megválasztásához. Végül ötödik célként egy olyan eljárás vizsgálata és jellemzése szükséges, amely a röntgentomográfias méréseken alapuló CAD-modell kompenzációját és a munkatérbeli optimális orientációt ötvözve minimalizálja a geometriai eltéréseket és a gyártógép rendszerszintű hibáit.

2.3 Kutatási módszertan

A doktori kutatás célkitűzéseinek elérése érdekében egy szisztematikus, elméleti alapozásra és kísérleti validációra épülő

kutatási keretrendszer került kidolgozásra. A módszertan alapvető célja, hogy a számítógépes tomográfia (CT) ipari metrológiai korlátait és az additív gyártástechnológiák pontossági problémáit egymással szoros összefüggésben, három fő kísérleti pilléren keresztül vizsgálja.

A kutatás első pillére az XCT és az NCT rendszerek dimenzionális metrológiai képességeinek közvetlen összehasonlítására fókuszált. A módszertan kulcseleme egy olyan új, multimateriális kalibrációs fantom tervezése és gyártása volt, amely mindkét sugárzástípus számára megfelelő képi kontrasztot nyújt. A méréseket követően a mérési bizonytalanságokat a nemzetközi GUM-irányelvek szerint határoztam meg, különös tekintettel a szisztematikus mérési hibák matematikai modellezésére és a rendszerek metrológiai egyenértékűségének statisztikai igazolására.

A második pillér a többanyagú (fém-polimer) alkatrészek XCT mérése során fellépő hibák feltárására irányult. A módszertan egy teljes faktoriális kísérlettervezésre (DoE) épült, amely során szisztematikusan változtattam a szkennelési paramétereket. A kísérletekhez egy egyedi hibrid próbatestet terveztem, amely lehetővé tette a fém és a polimer határfelületén jelentkező

kalibrált légrések hatásának vizsgálatát. A mérési hibák szignifikáns forrásait referenciamérések és többfaktoros varianciaanalízis (ANOVA) segítségével azonosítottam.

A harmadik pillér az additív gyártással (SLS) előállított vékonyfalú poliamid 12 (PA12) alkatrészek hőtechnikai torzulásainak csökkentését célozta meg. A kidolgozott módszertan egy iteratív, zárt láncú korrekciós folyamatból állt, amely az első gyártási ciklusból származó alkatrészek XCT-alapú mérésére épült. A mért eltérésekből számított elmozdulásvektorok ellentettjével módosítottam a kiinduló CAD-modellt (NURBS-felületkompenzáció), majd az újragyártott darabok geometriai pontosságának javulását és a munkatérbeli orientáció hatását statisztikai tesztekkel igazoltam.

3 Vizsgálati módszerek

3.1 Röntgen- és neutrontomográfia vizsgálata metrológiai szempontból

Az XCT és az NCT rendszerek metrológiai összehasonlítása, valamint a mérési bizonytalanságok meghatározása összetett módszertant igényel. A kísérleti folyamat a többanyagú kalibrációs fantom tervezésétől és gyártásától a fizikai méréseken át a nemzetközi mérésügyi irányelvek (GUM) szerinti bizonytalanság-meghatározásig és statisztikai kiértékelésig terjed.

A kalibrációs fantomot a vonatkozó metrológiai irányelv előírásai alapján terveztem meg. A geometriai aszimmetria biztosítására a gömböket egyenes vonalban helyeztem el, a középső gömböt pedig a szimmetriasíktól névlegesen eltoltam, ami eltérő hosszúságú méretek mérését tette lehetővé. A röntgen- és neutronsugárzás eltérő fizikai kölcsönhatásai miatt a gömbök anyagául cirkónium-dioxidot választottam, amely mindkét eljárásnál megfelelő kontrasztot biztosít. A tartószerkezet anyaga a neutronaktiváció elkerülése érdekében Ti6Al4V

titánötvözet lett, az összeszerelést pedig ragasztó vagy forrasztó helyett mechanikai rögzítéssel, kúpos fészkekkel ellátott szorítólemezekkel valósítottam meg.

A fizikai mérések előtt a fantom pontos geometriai méreteit nagy pontosságú tapintós koordináta-mérőgéppel határoztam meg, amelynek átlagolt eredményeit tekintettem a referenciaértékeknek. A tomográfiás vizsgálatok során a rendszerszintű különbségek feltárására három különböző kategóriájú XCT-berendezést alkalmaztam. A neutrontomográfiás méréseket az Budapesti Neutron Centrum kutatóreaktorának RAD-vizsgálati állomásán végeztem el, ahol a termikus neutronnyalábot zafírszűrővel optimalizáltuk a nagy energiájú neutronok kiszűrésével.

A rögzített projekciós képekből rekonstrukciós szoftverrel állítottam elő a 3D-voxeltérfogatokat, majd a VGStudio Max szoftverben a legkisebb négyzetek módszerével (Gauss) illesztettem gömböket a felületi pontokra a távolságok meghatározásához. A mérési bizonytalanság számszerűsítésére felírtam a mérés matematikai modelljét, amely bemeneti tényezőként figyelembe veszi a berendezés által kijelzett értéket, a referenciamérések korrekcióját, az

ismételhetőségi szórást, a felületi inhomogenitást, a hőtágulást és a rendszeres hibát.

A rendszeres mérési hiba beépítésére a kiterjesztett mérési bizonytalanságba négy különböző matematikai módszert vizsgáltam, beleértve a négyzetes összegzési eljárásokat, az egyszerű összegzést, valamint a VDA 5 autóipari ajánlás szerinti valószínűségi változó szerinti figyelembevételt. A különböző tomográfias berendezések metrológiai összehasonlíthatóságát normalizált hibaértékek (E_N -számok) számításával vizsgáltam, ahol az egynél kisebb abszolút értékű mutató jelezte a mérési eredmények metrológiai összehasonlíthatóságát.

3.2 Röntgentomográfiával történő dimenzionális mérések vizsgálata két anyagból felépülő alkatrésznél

A fémből és műanyagból összeállított hibrid alkatrész XCT-vel történő mérése komoly fizikai és mérés technikai korlátokba ütközik. Ezen akadályok feltárására és a mérési hibák számszerűsítésére egy sokrétű kísérleti és statisztikai módszertant dolgoztam ki, amellyel a két eltérő sugárelnyelő képességű anyag – az AlMgSi1 alumíniumötvözet és a

polioximetilén (POM) – határfelületén lejátszódó jelenségeket elemeztem.

A kísérleti munka a próbatest CNC-megmunkálásával indult. Az alumínium testbe készített furatokba illeszkedő POM csapok palástján hét lépcsős szegmenst alakítottam ki, amelyek átmérőjét lépcsőzetesen csökkentve biztosítottam, hogy az összeszerelt próbatestben a fém és a műanyag felületek között pontosan beállított, 0 és 125 mikrométer közötti levegőrés alakuljanak ki. A méréseket három konfigurációban végeztem el: külön-külön szkenneltem az alumínium testet és a műanyag csapokat az egyanyagú esetekben, a többanyagú vizsgálatnál pedig összeszerelt állapotban.

A megbízható viszonyítási alap megteremtéséhez az XCT szkennelések előtt az összes furat és csapszegmens referenciaértékét egy nagy pontosságú tapintós koordináta-mérőgéppel határoztam meg. A röntgentomográfiás felvételeket egy metrológiai XCT berendezéssel készítettem egy teljes, kétszintű, háromfaktoros kísérleti terv szerint, ahol a vizsgált faktorok a detektorpixel-egyesítés és az expozíciós idő kombinációja, a voxelméretet meghatározó ablakszélesség

(geometriai nagyítás), valamint a folyamatos és a szakaszos forgatási módok voltak.

A rögzített vetületi képekből rekonstruált voxeltérfogatok szegmentálását a Winwerth szoftverben végeztem el. Míg az egyanyagú felvételeknél az automatikus felületmeghatározás is megfelelő eredményt adott, a többanyagú hibrid térfogatoknál a fém és a műanyag óriási sűrűségkülönbsége miatt lokális keresőablakos szegmentálást alkalmaztam. A dimenzionális kiértékelés során a pontfelhőkön a referenciamérésekkel megegyező magasságokban metszeteket készítettem, és a kimetszett pontokra Gauss-módszerrel köröket illesztve határoztam meg az átmérőértékeket.

A fizikai mérések pontossága és a képminőség közötti kapcsolat feltárására lokális jel-zaj arány (SNR) és kontraszt-zaj arány (CNR) vizsgálatokat végeztem, amelyekhez gyűrű alakú térfogati modelleket illesztettem a csapok szegmenseinek a középvonalaira. A mérési hibák szignifikáns forrásainak azonosítására és a paraméterek közötti kölcsönhatások számszerűsítésére végül négyfaktoros varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztam 95 %-os szignifikanciaszinten.

3.3 SLS technológia vizsgálata XCT-vel

Az additív gyártástechnológiák, különösen a szelektív lézeres szinterezés (SLS) során, a vékonyfalú polimer alkatrészek jelentős mértékben hajlamosak a gyártási és a hűlési fázisban fellépő hőtechnikai folyamatok miatt torzulni. Ezen geometriai eltérések szisztematikus csökkentésére és a gyártási pontosság növelésére egy röntgentomográfiás (XCT) méréseken alapuló, iteratív CAD-modell kompenzációs eljárást vizsgáltam.

A kísérlethez egy kifejezetten a hőhatások okozta torzulásokra hajlamos és mérésére alkalmas, vékonyfalú, sík és hengeres felületeket egyaránt tartalmazó próbatestet terveztem. A gyártáshoz ipari minőségű PA12 port használtam, amelyet egy ProX SLS 6100 típusú berendezéssel nyomtattam ki. A gyártótérben fellépő lokális termomechanikai hatások és az orientáció befolyásának vizsgálatára a próbatesteket öt különböző térbeli orientációban helyeztem el, orientációnként tíz-tíz darabot pozícionálva a porágyban.

A nyomtatást és tisztítást követően a névleges 3D-s modellből legyártott minták XCT szkennelését egy GE Micromex röntgentomográfiás berendezéssel végeztem el. A rekonstruált

voxeltérfogatokon végrehajtott automatikus felületmeghatározás után egy robusztus koordináta-méréstechnikai programot írtam és futtattam le a VGStudio Max szoftverben. A mérésekhez a bázisrendszert vettem fel, majd meghatároztam a sík-sík távolságokat, valamint a hengeres felületek átmérőjét és pozícióját.

A torzulások számszerűsítése után a felületi pontfelhőket a névleges modellekre illesztettem, majd a lokális geometriai eltérésekből számított elmozdulásvektorok ellentettjével eltorzítottam a névleges 3D-s modellt. Ez a kompenzációs eljárás nem egyenközü, racionális B-splájnok (NURBS) alkalmazásával hozta létre a kompenzált modelleket. A kapott modelleket kiexportálva, a gyártási paramétereket és a térbeli pozíciókat megtartva, ismételt SLS-gyártást hajtottam végre, majd a kompenzált modellekből nyomtatott próbatesteket ismételten visszamértem az XCT-rendszerrel.

A kompenzációs eljárás hatékonyságának igazolására az első és a második gyártási ciklusból származó névleges eltéréseket statisztikai elemzésnek vettem alá. A síklapok távolságainak szórását Levene-tesztel vizsgáltam, amellyel bizonyítottam, hogy a kompenzáció hatására a méretek szórása szignifikánsan

lecsökkent. A gyártógép koordináta-tengelyeinek kalibrációs hibáit többfaktoros varianciaanalízis (ANOVA) segítségével tártam fel, amely igazolta a szisztematikus irányfüggőség megszűnését, míg a hengeres felületek pozícióhibáinak Kruskal-Wallis teszttel végzett elemzése kimutatta az optimális térbeli orientáció szignifikáns hatását.

4 Új tudományos eredmények

1. Tézis: Kidolgoztam és validáltam egy olyan, a röntgen- (XCT) és neutrontomográfiás (NCT) rendszerek objektív metrológiai összehasonlítására alkalmas módszertant [S1] és az ezt megvalósító új kalibrációs fantomot, melynek anyagszerkezeti kritériumait úgy határoztam meg, hogy azok mindkét képalkotó eljárás számára megfelelő kontrasztot biztosítsanak [S2], miközben a neutronsugárzás utáni alacsony aktivitás és rövid felezési idő lehetővé teszi az etalon biztonságos és ismételt felhasználását [S2]. A modellt sikeresen validáltam ittrium-oxiddal stabilizált cirkónium-dioxid gömbök és Ti6Al4V titánötvözet tartószerkezet alkalmazásával.
2. Tézis: Kimutattam, hogy a tomográfiás mérések jelentős rendszeres hibája (torzítása) miatt a VDA 5 ajánlás szerinti bizonytalanságszámítási módszer adja a legmegbízhatóbb eredményt a különböző rendszerek összehasonlításakor [S1]. Ezt a modellt alkalmazva meghatároztam a Budapesti Neutron Centrum neutrontomográfiás rendszerének

kiterjesztett mérési bizonytalanságát (0,092 mm, $k=2$), és igazoltam, hogy síkfelületek közötti távolságmérés esetén a neutron- és a metrológiai minőségű röntgentomográfia metrológiailag összehasonlítható eredményeket szolgáltat ($|E_N| \leq 1$) [S1]. Bár az NCT lényegesen nagyobb bizonytalansága tágabb elfogadási tartományt eredményez, az E_N értékek igazolják, hogy a két módszer közötti eltérések ezen a hibahatáron belül maradnak, vagyis az NCT-s mérések mentesek a szignifikáns szisztematikus hibától.

3. Tézis: Kvantitatívan igazoltam, hogy a többanyagú (fém-polimer) XCT mérések során a komponensek közötti légrés mérete és a sűrűségkülönbség komplex, szignifikáns hatást gyakorol a mérési pontosságra. Az összefüggés elvi alapja, hogy a nagy sűrűségkülönbségű határfelületeken fellépő képi műtermékek lokálisan torzítják a felületmeghatározó algoritmusok küszöbérték-számítását, amely hatás a légrés növekedésével nemlineáris mérési hibát eredményez [S3].
- a. Bizonyítottam, hogy egyanyagú és többanyagú mérési konfigurációk között szignifikáns különbség áll fenn a mérési pontosságban. A többanyagú vizsgálati daraboknál a mérési hiba akár nyolcszorosára is növekedhet, ami különösen a

- POM komponenseknél jelentős (a legjobb esetben is 11 μm -ról 50 μm -re emelkedik), míg az alumínium komponenseknél mérsékeltebb (6 μm -ról 20 μm -re) [S3].
- b. Meghatároztam, hogy többanyagú vizsgálati daraboknál a légrések mérete meghatározó szerepet játszik a mérési pontosság alakulásában. A voxelméret csökkentése (68 μm -re) és az optimalizált expozíciós paraméterek alkalmazása (1x1 binning, 250 ms expozíciós idő) szignifikánsan csökkenti a mérési hibát, különösen a légréseket tartalmazó anyaghatároknál [S3]. A mérési hiba a légrések növekedésével (25 μm -tól 125 μm -ig) szisztematikusan növekszik, majd a légrés nélküli szegmenseknél csökken [3].
 - c. Kimutattam, hogy a többanyagú konfigurációban a nagyobb sűrűségű anyag (alumínium) jelenléte jelentős felületi műtermékeket okoz az alacsonyabb sűrűségű anyag (POM) mérésénél, ami értékes támpontot nyújt az XCT szkennelési paraméterek ipari metrológiai alkalmazásokban történő optimalizálásához [S3, S4].
4. Tézis: Kimutattam, hogy az XCT szkennelési paraméterek (voxelméret, pixelegyesítés) és a képminőségi mutatók

(CNR, SNR) közötti összefüggés alapvetően különbözik egy- és többanyagú mérések esetén: míg egyanyagú konfigurációban a kisebb voxelméret egyértelműen javítja a pontosságot, addig többanyagú esetben a paraméterek hatása komplex mintázatokat követ, ahol a komponensek közötti légrés jel-zaj viszonya (SNR) és szűrkeségi értéke is jellegzetes, a beállításoktól függő változást mutat [S4].

- a. Egyanyagú vizsgálati darabok esetén igazoltam, hogy a kisebb voxelméreteket ($68\ \mu\text{m}$) következetesen magasabb kontraszt-zaj arányt (CNR) és alacsonyabb mérési hibákat eredményeznek, mint a nagyobb voxelméreteket ($149\ \mu\text{m}$). Az 1x1-es detektor-pixelegyesítési mód 250 ms expozíciós idővel és az optimalizált ablakméret szignifikánsan javítja a mérési pontosságot mind az alumínium, mind a polioximetilén (POM) komponenseknél [S4].
- b. Többanyagú vizsgálati darabok esetén bizonyítottam, hogy a légrések jel-zaj aránya (SNR) arányosan csökken a légrés növekedésével ($25\ \mu\text{m}$ -tól $125\ \mu\text{m}$ -ig) az alumínium és POM anyagok közötti határfelületen, míg a légrések szűrkeségi értékei jellegzetes elkülönülési mintázatokat mutatnak a detektor pixelelegyesítési mód, voxelméret és forgatási mód függvényében [S4].

5. Tézis: Kimutattam, hogy a szelektív lézeres szinterezéssel (SLS), poliamid 12 (PA12) anyagból gyártott alkatrészek méretpontosságának javításában a CAD modell kompenzációja mellett az alkatrész munkatérben való orientációjának tudatos megválasztása [S5, S6, S7] is szignifikáns hatású. Igazoltam, hogy egy röntgentomográfiás (XCT) méréseken alapuló, a mért eltérések ellentettjét felhasználó kompenzációs eljárás nem csupán a síkfelületek közötti távolságok pontosságát növeli, hanem a gyártóberendezés rendszerszintű kalibrációs hibáit is korrigálja [S5]. Ezen felül bizonyítottam, hogy a kompenzáció hatása mellett az orientáció optimális megválasztásával a hengeres felületek pozíciója szignifikáns mértékben javítható [S8].

5 Irodalmi hivatkozások listája

- [1] Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (Eds.). (2018). Industrial X-ray computed tomography (Vol. 10, pp. 978-973). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [2] Ferrucci, M., & Ametova, E. (2021). Charting the course towards dimensional measurement traceability by X-ray computed tomography. *Measurement Science and Technology*, 32(9), 092001.
- [3] Kruth, J. P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L., & Weckenmann, A. (2011). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP annals*, 60(2), 821-842.
- [4] Bartscher, M., Sato, O., Härtig, F., & Neuschaefer-Rube, U. (2014). Current state of standardization in the field of dimensional computed tomography. *Measurement Science and Technology*, 25(6), 064013.
- [5] Müller, P., Hiller, J., Cantatore, A., & De Chiffre, L. (2012). A study on evaluation strategies in dimensional X-ray computed tomography by estimation of

- measurement uncertainties. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 3(2), 107-115.
- [6] Bartscher, M., Hilpert, U., & Fiedler, D. (2008). Determination of the measurement uncertainty of computed tomography measurements using a cylinder head as an example. *Technisches Messen*, 75(3), 178-186.
- [7] Abdullah, M.Z., Ashaari, N.A., Aziz, M.A. (2009). Development of a neutron tomography system for industrial applications. *Measurement*, 42(7), 1017–1026.
- [8] Lehmann, E. H., Kaestner, A., Grünzweig, C., Mannes, D., Vontobel, P., & Peetermans, S. (2014). Materials research and non-destructive testing using neutron tomography methods. *International journal of materials research*, 105(7), 664-670.
- [9] Jansson, A., Ekengren, J., Zekavat, A. R., & Pejryd, L. (2016). Effects of X-ray penetration depth on multi material computed tomography measurements. In 6th Conference on Industrial Computed Tomography.
- [10] Cao, W., Hawker, S., Fardell, G., Price, B., & Dewulf, W. (2019). An improved segmentation method for

- multi-material beam hardening correction in industrial x-ray computed tomography. *Measurement Science and Technology*, 30(12), 125403.
- [11] Fonfría, Í., Holgado, I., Ortega, N., Castrillo, A., & Plaza, S. (2025). Improving the Efficiency and Quality of Sustainable Industrial CT by Optimizing Scanning Parameters. *Sensors*, 25(8), 2440.
- [12] Gulliksrud, K., Stokke, C., & Martinsen, A. C. T. (2014). How to measure CT image quality: variations in CT-numbers, uniformity and low contrast resolution for a CT quality assurance phantom. *Physica Medica*, 30(4), 521-526.
- [13] Jadayel, M., & Khameneifar, F. (2020). Improving geometric accuracy of 3D printed parts using 3D metrology feedback and mesh morphing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4), 112.
- [14] Thompson, A., Maskery, I., & Leach, R. K. (2016). X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review. *Measurement Science and Technology*, 27(7), 072001.
- [15] Evans, L.M., Minniti, T., Fursdon, M., et al. (2018). Comparison of X-ray and neutron tomographic

- imaging to qualify manufacturing of a fusion divertor tungsten monoblock. *Fusion Engineering and Design*, 134, 97–108
- [16] Brzosko, J.S., Robouch, B.V., Ingrosso, L., Bortolotti, A., Nardi, V. (1992). Advantages and limits of 14 MeV neutron radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 72, 119–131.
- [17] Gokul, P., Kumar, J. A., Preetha, R., Chattopadhyaya, S., & Mini, K. M. (2023). Additives in concrete to enhance neutron attenuation characteristics—A critical review. *Results in Engineering*, 19, 101281
- [18] Kondev, F. G., Wang, M., Huang, W. J., Naimi, S., & Audi, G. (2021). The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties. *Chinese physics C*, 45(3), 030001.
- [19] Hermanek, P., Borges de Oliveira, F., Bartscher, M., & Carmignato, S. (2017). Experimental investigation of new multi-material gap reference standard for testing computed tomography systems. 7th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2017, 7-9 Feb, Leuven, Belgium. *e-Journal of Nondestructive Testing* Vol. 22(3).

- [20] Gallardo, D., Díaz, L. C., Zanini, F., Albajez, J. A., Carmignato, S., & Yagüe-Fabra, J. A. (2024). On the effect of material density in dimensional evaluations by X-ray computed tomography of metal-polymer multi-material parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 54, 1-13.

6 Tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [S1] **Marczis, A.**, Kis, Z., & Dregelyi-Kiss, A. (2026). Metrological characterisation of neutron and X-ray computed tomography. *Precision Engineering*, 99, 575-592.
- [S2] **Marczis, A.**, Kis, Z., & Drégelyi-Kiss, Á. (2023, October). On the Material Selection of Gauge for the Comparison of X-Ray and Neutron Tomography. In *The International Symposium for Production Research* (pp. 275-285). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [S3] Drégelyi-Kiss, A., & **Marczis, A.** (2025). Air Gap Effects on Dimensional Accuracy in Multi-Material X-ray CT Measurements. *Results in Engineering*, 108408.
- [S4] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2026). Evaluation of Volumetric Image Quality in X-ray Computed Tomography for Single-and Multi-Material Samples Using Variable Scanning Parameters. *E-JOURNAL*

OF NONDESTRUCTIVE TESTING 31 : 3 pp. 1-7., 7 p.

- [S5] **Marczis, A.**, Odrobina, M., & Drégelyi-Kiss, Á. (2024). Computed tomography as distortion mitigation method for selective laser sintering mass production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133(9), 4845-4864.
- [S6] **Marczis, A.**, Mikó, B., & Drégelyi-Kiss, Á. (2026). Influence of part orientation and spatial placement on the dimensional and surface quality of SLS-printed PA12 components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-15.
- [S7] Drégelyi-Kiss, Á., Mikó, B., & **Marczis, A.** (2025, March). Effect of Orientation and Location on Surface Roughness of SLS PA12 parts. In *2025 24th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)* (pp. 1-6). IEEE.
- [S8] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2025). Dimensional and geometrical characterization of plastic powder bed fusion parts through computed tomography. *Measurement: Sensors*, 38, 101843.

7 További tudományos közlemények

- [S9] Dregelyi-Kiss, Á., Lóránd, Á., & **Marczis, A.** (2026). Evaluation of Diameter Measurement Errors in Bores and Shafts Using X-ray Computed Tomography and Different Fitting Methods. E-JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE TESTING (1435-4934 1435-4934): 31 3 pp 1-6.
- [S10] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2026). Evaluation of Volumetric Calibration for Dimensional Accuracy in X-ray and Neutron Computed Tomography. Acta Technica Napocensis – Applied Mathematics Mechanics and Engineering (1221-5872 2393-2988): 1 1 p. 100.
- [S11] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2024). Körök mérésének befolyásoló tényezői profilprojektorral történő méréseknél. BÁNKI KÖZLEMÉNYEK (2560-2810): 3 pp 50-56.
- [S12] Drégelyi-Kiss, Á., & **Marczis, A.** (2018, September). Distance measurements on compound workpiece with industrial computed tomography. In *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering (Vol. 426, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.

- [S13] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2024). Köralak mérésének vizsgálata profilprojektossal történő mérések során GYÁRTÓESZKÖZÖK, SZERSZÁMOK, SZERSZÁMGÉPEK (1587-9267): 1 pp 22-25 (2015)
- [S14] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2016). Determination of the number of measurement points in case of sheetmetal parts In: Zebala W ; Mankova. Development in Machining Technology Vol. 6. Cracow: Cracow University of Technology Press, pp 66-75