

ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

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 9.

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Halász Marianna, CSc, Óbudai Egyetem

Titkár:

Dr. Varga Bálint, adjunktus, Óbudai Egyetem

Tagok:

Dr. Maróti Boglárka, tudományos főmunkatárs, HUN-REN, Nukleáris Analitikai
és Radiográfiai Laboratórium

Dr. Takács Erzsébet, egyetemi tanár, DSc, HUN REN TTK

Dr. Kovács András, egyetemi docens, Pannon Egyetem

Bírálok:

Prof. Dr. Kukovecz Ákos, DSc, egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem

Dr. habil. Hermann Gyula, PhD, nyugalmazott egyetemi docens, Óbudai
Egyetem

Az Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola Vezetője:

Prof. Dr. Réger Mihály

Nyilvános védés időpontja:

.....

D12) Nyilatkozat a munka önállóságáról, irodalmi források megfelelő módon történt idézéséről

NYILATKOZAT

A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK

MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott **Marczis Attila** kijelentem, hogy a **Fejlett számítógépes tomográfiai technikák az additív gyártástechnológia területén: torzuláscsökkentés és dimenzionális mérések** című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott

forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest,

..... (aláírás)

D13) Nyilatkozat a nyilvánosságra hozatalról

NYILATKOZAT A NYILVÁNOSSÁGRA HOZATALRÓL

Alulírott **Marczis Attila** kérem,

hogy a **Fejlett számítógépes tomográfiai technikák az additív gyártástechnológia területén: torzuláscsökkentés és dimenzionális mérések** című doktori értekezésem interneten történő nyilvánosságra hozatala

☐ Korlátozás nélkül;

☐ Elérhetőség csak magyarországi címről;

☐ A fokozat odaítélését követően 2 év múlva, korlátozás nélkül;

☐ A fokozat odaítélését követően 2 év múlva, csak magyarországi címről történjen meg.

Budapest,

.....

aláírás

*a megfelelő választást kérjük aláhúzni

TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS.....	4
2	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	6
2.1	Metrológia.....	6
2.2	Ipari mérések és a CT technológia.....	11
2.3	AM technológiák.....	27
3	CÉLKITŰZÉSEK.....	33
3.1	Szakirodalomban feltárt hiányosságok.....	33
3.2	A kutatás célkitűzései.....	34
3.3	Kutatási módszertan.....	35
4	RÖNTGEN- ÉS NEUTRONTOMOGRAFIA ÖSSZEHASONLÍTÁSA METROLÓGIAI SZEMPONTBÓL.....	36
4.1	Kalibrációs fantom és vizsgálati darab tervezése.....	36
4.2	Kalibrációs fantom és vizsgálati darab anyagválasztása.....	37
4.3	Mérések.....	40
4.4	A kidolgozott mérési modell.....	44
4.5	Eredmények.....	48
4.6	A vizsgálati darab eredményei.....	57
4.7	Következtetések.....	58
5	RÖNTGENTOMOGRAFIAÁVAL TÖRTÉNŐ DIMENZIONÁLIS MÉRÉSEK VIZSGÁLATA KÉT ANYAGBÓL FELÉPÜLŐ ALKATRÉSZNÉL.....	60
5.1	Vizsgálati darab tervezése és gyártása.....	60
5.2	Referenciamérések.....	62
5.3	Röntgentomográfiás mérések és kísérlettervezés.....	62
5.4	A jel-zaj és a kontraszt-zaj arány vizsgálata.....	65
5.5	A dimenzionális mérések eredményei.....	66
5.6	A jel-zaj arány és a kontraszt-zaj arány vizsgálatok eredményei.....	78

5.7	Következtetések	82
6	SLS TECHNOLÓGIA VIZSGÁLATA XCT-VEL	83
6.1	A tervezés és gyártási folyamat.....	83
6.2	Mérések.....	87
6.3	Torzulás javítása	89
6.4	Eredmények	91
6.5	Statisztikai elemzések a síklapok távolságára.....	93
6.6	Hengeres felületek pozícióinak eredményei.....	99
6.7	Következtetések	102
7	ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK.....	103
7.1	Új tudományos eredmények.....	103
8	IRODALOMJEGYZÉK.....	105
9	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	125
10	MELLÉKLETEK.....	127
11	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	133

1 Bevezetés

Az additív gyártástechnológiák egyre szélesebb körben terjednek el az ipari alkalmazásokban, a gyors prototípusgyártáson túllépve már a kis- és közepes sorozatú gyártást is lehetővé teszik. Ez az ipari felhasználás magas követelményeket támaszt az elkészült alkatrészek geometriai pontosságával és ismételhetőségével szemben. A komplex belső és külső geometriák roncsolásmentes ellenőrzésére a tomográfiás (CT) eljárások adhatnak megoldást, azonban alkalmazásuk számos kihívást rejt.

A 3D nyomtatott alkatrészek tervezésénél nem szükséges a szubtraktív vagy hagyományos forgácsolási eljárásoknál alkalmazott tervezési megkötéseket alkalmazni. A 3D nyomtatott alkatrészeknél lehetőség van olyan belső vagy alámetszett felületek gyártására, amit szubtraktív eljárással nem lehet gyártani. Az ilyen felületek metrológiai jellemzése tapintós és optikai mérőeszközökkel gyakran nem lehetséges. Az additív gyártástechnológiával készült alkatrészek minőség-ellenőrzésében növekvő szerepet játszanak a CT képalkotó eljárások. A CT mérőberendezések olyan 3D-s, voxelekből álló térfogati képet készítenek, melyen a vizsgálati darab teljes térfogatában látható. A CT képalkotáshoz szükség van egy olyan sugárforrásra, mely képes áthatolni a vizsgálati darabon megfelelő mértékű elnyelődés mellett. A vizsgálati darabról a szkennelés során több ezer projekciós kép készül egy teljes körbeforgatás alatt, majd ezekből a képekből rekonstrukciós algoritmussal készül el a voxeltérfogat. Az egyes voxelek szűrkeségi értéke az adott elemi térrészben elnyelődött sugárzás mértékével arányos. A voxeltérfogatban leképezett vizsgálati darab felületi pontfelhője szegmentációs eljárással hozható létre. Az így keletkezett felületi pontfelhő már felhasználható koordináta-méréstechnikai feladatokra.

A CT mérések pontosságát azonban tovább bonyolítja, ha nem egyetlen anyagból, hanem több, különböző anyagból álló összeállítást vizsgálunk. Az ipari gyakorlatban gyakoriak az olyan egységek, melyekben egymás mellett különböző anyagból (pl. fém és műanyag) készült komponensek helyezkednek el. A gyártási és illesztési pontatlanságok miatt gyakran mikrométeres nagyságrendű légrések (hézagok) alakulnak ki az alkatrészek között. Ezek a légrések, valamint a sűrűségkülönbségből adódó sugárzáselnyelődési különbségek jelentős képi műtermékeket, például sugárkeményedést és szóródást okozhatnak, amelyek megnehezítik a felületek pontos meghatározását. Ennek következtében a mérési pontosság romlik, különösen az alacsonyabb sűrűségű anyag mérésénél. A légrés méretének, az anyagpárosításnak és a szkennelési paramétereknek a mérési hibára gyakorolt komplex hatásának vizsgálata ezért kiemelt fontosságú kutatási terület.

A két leggyakrabban alkalmazott számítógépes tomográfiai eljárások a röntgen- (XCT), és a neutrontomográfia (NCT). A két eljárás között több különbség is van, ilyen például az áthatoló sugárzás fajtája, a sugárnyaláb kúpszöge, az elnyelődés mértéke a különböző anyagokban és a sugárzás detektálásának módja. Az XCT rendszereket alacsonyabb rendszámú anyagoknál lehet alkalmazni, mert a röntgensugárzás elnyelődése a rendszámmal arányos. Az NCT képalkotásnál a neutronsugárzás elnyelődésének mértéke nem monoton növekszik a rendszám növekedésével. Az NCT előnye főleg akkor mutatkozik meg, amikor az adott alkatrész már nem világítható át röntgensugárzással. Bizonyos anyagok, például egyes nehézfémek könnyen átvilágíthatók neutronsugárzással akár nagyobb méretben is. Az XCT metrológiai visszavezetettséggel kapcsolatban a szakirodalomban rengeteg hivatkozást találunk, míg az NCT-vel szinte semmit.

Jelen disszertáció ezen kihívásokra keresi a választ három fő kutatási területen keresztül.

Munkám első részében a tomográfias mérések metrológiai megalapozását tűztem ki célul. Ennek érdekében egy új, kifejezetten a röntgen- (XCT) és a neutrontomográfias (NCT) rendszerek objektív összehasonlítására tervezett kalibrációs fantomot mutatok be, amely lehetővé teszi a két, eltérő fizikai elveken működő képalkotó eljárás mérési képességének és bizonytalanságának jellemzését.

A második részben egy gyakori ipari problémára, a több, eltérő sűrűségű anyagból (pl. fém és műanyag) felépülő összeállítások mérésére fókuszálok. Szisztematikusan vizsgálom, hogy a komponensek közötti légrések, az anyagpárosítás és a szkennelési paraméterek hogyan befolyásolják a dimenzionális mérések pontosságát, kvantitatív összefüggéseket tárva fel a tényezők között.

Végül, a harmadik részben egy meglévő, visszacsatoláson alapuló torzuláscsökkentési módszert alkalmazok a tömeggyártásra is alkalmas *selective laser sintering* (SLS) 3D nyomtatási technológiára. Az XCT mérésekre épülő eljárás a mért geometriai torzulások alapján kompenzálja a kiinduló CAD modellt. Kutatásom során e módszer hatását vizsgálom egy általam tervezett vizsgálati darab pontosságára, részletes mérés technikai jellemzők elemzésén keresztül.

2 Irodalmi áttekintés

2.1 Metrológia

A dimenzionális metrológia a mérés tudománya, amely tárgyak méretének, alakjának és térbeli helyzetének meghatározásával foglalkozik. Ez a terület alapvető fontosságú gyártott alkatrészek minőség-ellenőrzésénél [1, 2], és elengedhetetlen több iparágban, mint például az autó-, repülőgép-, félvezetőipar és optika.

Ez a tudományág és annak alkalmazása magában foglal minden elméleti és gyakorlati kérdést, ami a mérésekkel kapcsolatos, függetlenül azok pontosságától vagy alkalmazási területétől. A modern ipari és tudományos környezetben a mérés egy gondosan megtervezett, strukturált folyamat, amelynek minden eleme – az eszközök és módszerek kiválasztásától a környezeti feltételek kontrollján át az adatok feldolgozásáig – befolyásolja az eredmény megbízhatóságát. Az Ipar 4.0 korában a mérés technika a gyártási és minőségbiztosítási folyamatok integrált részévé vált, alapvető szerepet játszva az adatalapú döntéshozatalban [3].

A metrológia alapvető küldetése három, egymásra épülő tevékenységen keresztül valósul meg. Elsőként, a tudomány feladata, hogy nemzetközileg elfogadott mértékegységeket határozzon meg, egységes elvek szerint definiálva az olyan alapvető egységeket, mint a méter vagy a kilogramm. Ezt követi a mértékegységek gyakorlati megvalósítása, amely során tudományos módszerekkel, például lézeres interferométerrel reprodukálják az elméletben definiált egységeket. Végül, a harmadik pillér a visszavezethetőség láncolatának kialakítása, amely a mérőeszközök kalibrálásán és dokumentálásán keresztül biztosítja a mérések pontosságát és globális összehasonlíthatóságát [4].

A metrológia funkciója szerint több területen is megnyilvánul. A tudományos metrológia az általános méréselméleti kérdésekkel, a mértékegységrendszerek fejlesztésével, a mérési hibák és bizonytalanságok elemzésével, valamint az etalonok létrehozásával foglalkozik. Ezzel szemben a törvényes metrológia, más néven mérésügy, egy jogi eszközökkel szabályozott terület, amely a mérések hitelességét garantálja a kereskedelem, a fogyasztóvédelem és a biztonság szempontjából kritikus területeken. Az ipari metrológia pedig az ipari termelésben és vizsgálatokban alkalmazott mérésekre fókuszál, biztosítva a gyártási folyamatokhoz szükséges pontosságú és megbízhatóan kalibrált mérőeszközöket [5].

A Nemzetközi Metrológiai Szótár, VIM3 [6] szerint a mérés egy olyan tapasztalati úton történő folyamat, amely során egy vagy több, a mennyiségnek indokoltan tulajdonítható értéket határoznak meg. A mérési eredmény tehát nem csupán egyetlen mérőszám, hanem egy értékkészlet, amely a mért mennyiséghez tartozó mértékegységet és a mérési bizonytalanságot is magában foglalja. Maga a mérési folyamat egy logikus ívet követ. A folyamat a mérési feladat pontos meghatározásával kezdődik, amely során tisztázni kell a mérendő mennyiséget, a mérés célját és a pontossági követelményeket. Ezt követi a feladathoz és a környezeti feltételekhez illeszkedő mérési elv és módszer kiválasztása. A harmadik szakaszban történik a tényleges mérés végrehajtása, vagyis az adatgyűjtés és a szükséges ellenőrzések elvégzése. Végül a folyamat az adatfeldolgozással és értékeléssel zárul, amely magában foglalja a szükséges korrekciók elvégzését, a statisztikai elemzést és az eredmények szakszerű dokumentálását.

2.1.1 Mérési hiba és metrológiai visszavezetettség

A mérési eredmények megbízhatóságának alapja a mérési hibák megértése és kezelése, valamint a mérések visszavezethetőségének biztosítása. A mérési hiba a mért érték és a mennyiség referencia értéke közötti különbség. Egy mérés annál pontosabb, minél kisebb a mérési hibája.

A mérési hibák feltárásának és a pontosság biztosításának kulcsfontosságú eszköze a kalibrálás. Ez egy olyan művelet, amely meghatározott körülmények között összefüggést állapít meg egy etalon által képviselt (ismert bizonytalanságú) értékek és a mérőeszköz által mutatott értékek között. A kalibrálás célja a mérőeszköz hibáinak és eltéréseinek számszerűsítése, ami lehetővé teszi a mérési eredmények korrekcióját és összehasonlíthatóságát. A rendszeres kalibrálás elengedhetetlen a mérések pontosságának hosszú távú fenntartásához.

A kalibrálás szorosan kapcsolódik a metrológiai visszavezetettség fogalmához, amely a modern méréstudomány egyik sarokköve [7]. A metrológiai visszavezetettség egy mérési eredmény azon tulajdonsága, amely révén az egy referenciához kapcsolható a kalibrálások dokumentált, megszakítatlan láncolatán keresztül, ahol minden egyes láncszem hozzájárul a teljes mérési bizonytalansághoz [8]. Ez a láncolat biztosítja, hogy egy adott műhelyben, egy egyszerű tolómérővel végzett mérés is kapcsolatba hozható legyen a nemzeti, sőt nemzetközi etalonokkal, végső soron pedig az SI mértékegységrendszer definícióival. A visszavezetettség rendszerének működőképességét több tényező együttesen biztosítja. Alapja egy megszakítatlan kalibrálási lánc, amely egy hierarchikus rendszer, ahol a mérőeszközt egy nagyobb pontosságú etalonnal kalibrálják, azt pedig egy még pontosabbal, egészen a legmagasabb szintű referenciáig. A rendszer átláthatósága a teljes körű dokumentáltság szavatolja, vagyis a lánc minden lépését,

beleértve az eljárást, az eredményeket és a bizonytalanságot, rögzíteni kell. Végül, a rendszer kvantitatív megbízhatóságát a mérési bizonytalanság meghatározása adja, mivel a lánc minden szintjén ismert bizonytalanságok összegződve határozzák meg a végső mérési eredmény megbízhatósági tartományát. A visszavezetettség tehát nem egy eszköz tulajdonsága, hanem a teljes mérési folyamatot jellemző minőségi kritérium, amely garantálja, hogy a különböző helyeken és időpontokban végzett mérések eredményei globálisan is összevethetők és megbízhatók legyenek.

2.1.2 A mérési bizonytalanság

A méréstudományban alapvető tény, hogy egyetlen mérés sem lehet tökéletesen pontos. A mérési bizonytalanság az a paraméter, amely a mérési eredményhez társítva jellemzi a mérendő mennyiségnek ésszerűen tulajdonítható értékek szóródását [9]. Fontos megkülönböztetni a hibától: míg a hiba egyetlen, elvileg korrigálható eltérés a referencia értéktől, addig a bizonytalanság egy tartományt jelöl ki a mért érték körül, amelyen belül a valódi érték nagy valószínűséggel elhelyezkedik. A VIM3 definíciója szerint a mérés eredménye egy értékészlet, amelyet leggyakrabban egyetlen mért érték és a hozzá tartozó mérési bizonytalanság formájában fejeznek ki. A bizonytalanság megadása nélkül egy mérési eredmény tudományos és műszaki szempontból hiányos, mivel nem ad információt annak megbízhatóságáról.

A mérési bizonytalanság számos, egymástól független forrásból eredhet, amelyek együttesen járulnak hozzá a végeredmény szóródásához. Ilyen forrás lehet maga a mérendő mennyiség nem teljes vagy tökéletlen definíciója, a mérőeszköz véges felbontása és korlátozott ismétlőképessége, valamint a kalibráláshoz használt etalonok saját, öröklött bizonytalansága. Emellett jelentős hatással lehetnek a környezeti feltételek, mint például a hőmérséklet, a páratartalom vagy a rezgések ingadozása, de akár a mérési eljárást végző személy szubjektív hatásai is, például a leolvasás során [10]. A metrológiai visszavezetettség láncolatának minden egyes kalibrálási lépése szintén hozzájárul a teljes bizonytalansághoz. Egy komplex mérési modell esetén, ahol több bemenő mennyiség határozza meg a végeredményt, minden egyes komponens visszavezetettségét és bizonytalanságát figyelembe kell venni.

A mérési bizonytalanság ismerete elengedhetetlen a mérési eredmények helyes értelmezéséhez. Lehetővé teszi két vagy több mérési eredmény objektív összehasonlítását, valamint annak eldöntését, hogy egy termék vagy folyamat megfelel-e a specifikációknak és tűréseknek. A bizonytalanság számszerűsítése tehát nem a mérés gyengeségét jelzi, hanem éppen ellenkezőleg: a mérési folyamat minőségének és megbízhatóságának kvantitatív mércéje. A metrológia, a

visszavezetettség és a bizonytalanság hármasa így alkot egy koherens rendszert, amely a modern tudományos és technológiai fejlődés megkérdőjelezhetetlen alapját képezi.

2.1.3 MSZ EN ISO 1101:2017: Termék geometriai követelményei (GPS)

Az előzőekben tárgyalt metrológiai alapelvek – a visszavezetettség és a mérési bizonytalanság – gyakorlati megvalósulásának egyik példája a modern mérnöki tervezésben és gyártásban az ISO GPS [11] rendszere. A *Geometrical Product Specification* (GPS) egy nemzetközileg szabványosított műszaki rajzi jelölési rendszer, amelynek célja, hogy egyértelműen definiálja a munkadarabok geometriai követelményeit a tervezéstől a gyártáson át egészen a minőség-ellenőrzésig. Ez a rendszer hidat képez a metrológiai koncepciók és a fizikai termékek funkcionális elvárásai között.

A GPS alapvető szerepe, hogy közös nyelvet teremtsen a tervezők, gyártók és metrológusok között, minimalizálva ezzel a félreértelmezésből adódó hibákat és költségeket [12, 13]. A rendszer, amelyet az ISO/TC 213-as műszaki bizottság fejleszt, egy szabványgyűjtemény, amely lefedi a mérettűréseket, az alak, helyzeti és iránytűréseket, valamint a felületi érdességgel kapcsolatos előírásokat is [14]. Ennek a közös nyelvnek a hiányában a műszaki rajzokon szereplő előírások értelmezése szubjektívvá válhat, ami eltérésekhez vezethet a gyártás és az ellenőrzés során, rontva a termékminőséget és a különböző lokációkban gyártott alkatrészek csereszabotosságát [15].

A GPS rendszer egyik központi eleme a dualitás elve, amely szorosan összekapcsolja a specifikációt és a verifikációt (azaz az ellenőrző mérést) [16, 17]. Ez azt jelenti, hogy egy geometriai követelmény műszaki rajzon való megadása (specifikáció) elválaszthatatlan attól a folyamattól, amellyel annak teljesülését ellenőrizni fogják (verifikáció). A szabványok pontosan definiálják, hogy egy adott tűrés milyen mérési eljárást és kiértékelési módszert feltételez, így a tervező már a specifikáció megadásakor implicit módon meghatározza a későbbi mérési feladatot is [18]. Ez a megközelítés garantálja, hogy a termék funkcionális követelményei egyértelműen és megismételhetően ellenőrizhetők legyenek, és közvetlen kapcsolatot teremtsen a tűrésezés és a mérési bizonytalanság koncepciója között [19].

A GPS szabványok alkalmazása alapvető hatással van az igények megadásának pontosságára és egyértelműségére. Azáltal, hogy megengedett geometriai eltéréseket definiálnak, lehetővé teszi az alkatrészek alakjának, helyzetének és irányának precíz szabályozását, ami elengedhetetlen a nagy pontosságot igénylő iparágakban, mint például az autó- vagy a repülőgépipar. A szabványosított előírások és mérési eljárások biztosítják a mérések

konzisztenciáját a különböző operátorok és gyáregységek között, ami a globális beszállítói láncok korában kulcsfontosságú [20]. A GPS rendszer így nem csupán a minőség-ellenőrzést támogatja, hanem a nemzetközi kereskedelmet is elősegíti, mivel egységes keretrendszert biztosít a termékek gyártásához és ellenőrzéséhez, csökkentve a piacra lépés technikai akadályait.

A rendszer összetettsége és folyamatos fejlődése ugyanakkor kihívásokat is támaszt. A GPS szabványok szoros hálózatot alkotnak, gyakran hivatkoznak egymásra, ami megnehezíti a navigációt és az átfogó ismeretek elsajátítását [13]. Emellett különbségek léteznek a különböző szabványrendszerek, például az ISO GPS és az amerikai ASME Y14.5 között, amelyek az alapértelmezett szabályokban vagy a grafikai jelölésekben eltérhetnek, ami értelmezési problémákhoz vezethet a nemzetközi együttműködések során [20, 21]. A technológiai fejlődés, például az ipari komputertomográfia (CT) elterjedése szintén újabb szabványosítási igényeket vet fel, biztosítva, hogy a legmodernebb mérési technológiák is illeszkedjenek a GPS keretrendszerébe [22].

2.1.4 Nemparaméteres statisztikai módszerek a metrológiában

A metrológiai és minőségbiztosítási kísérletek során kapott mérési eredmények elemzéséhez megfelelő statisztikai próbákat kell alkalmazni. A gyártástechnológiai kutatásokban a leggyakoribb feladat a különböző csoportok (például eltérő gyártási paraméterekkel vagy különböző gépeken készült darabok) mérési eredményeinek összehasonlítása. Ha normális eloszlásúak az adatok, a csoportok átlagainak összehasonlítására a klasszikus egyszempontos varianciaelemzést (ANOVA) használják [23]. Azonban a modern gyártástechnológiák, különösen az AM során fellépő szisztematikus geometriai torzulások miatt a mérési adatok eloszlása gyakran jelentősen eltér a normálistól. Ilyen esetekben a parametrikus tesztek helyett nemparaméteres eljárásokat kell alkalmazni [24].

Három vagy több független csoport összehasonlítására a szakirodalomban leggyakrabban alkalmazott nemparaméteres eljárás a Kruskal-Wallis teszt, amely az ANOVA robusztus alternatívája [23, 25]. A teszt legfőbb elméleti előnye, hogy nem tesz feltételezést az adatok eloszlásának típusára vonatkozóan, így kiválóan alkalmas erősen ferde eloszlások, illetve ordinális (sorrendi) adatok elemzésére is [23, 26].

A módszer alapelve, hogy a tényleges mérési értékek helyett azok rangszámait hasonlítja össze. A számítás során az összes csoport adatát egyetlen közös mintaként kezelve növekvő sorrendbe rendezik, és minden egyes értékhez egy rangszámot rendelnek [26]. A teszt azt vizsgálja, hogy a

különböző csoportokból származó rangszámok eloszlása szignifikánsan eltér-e egymástól. A Kruskal-Wallis-féle H-statisztika matematikai alakja a következő [23]:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (1)$$

ahol:

N a teljes mintaméret,

k a csoportok száma,

n_i az i -edik csoport elemszáma,

R_i pedig az i -edik csoport rangösszege.

Ha a mintában azonos mérési értékek (úgynevezett holtversenyek) szerepelnek, a képletet egy korrekciós tényezővel módosítani kell a p-értékek torzulásának elkerülése érdekében [23, 27].

Bár a Kruskal-Wallis teszt rendkívül rugalmas, az irodalom rámutat arra a korlátjára, hogy érzékeny a csoportok közötti jelentős szóráshibákra (heteroszedaszticitás), különösen, ha a csoportok elemszáma nem egyenlő [28]. Fontos korlát továbbá, hogy a teszt csupán azt mutatja ki, hogy van-e globális eltérés a csoportok között, de azt nem, hogy pontosan melyek térnek el egymástól. Emiatt a szignifikáns Kruskal-Wallis eredményt a szakirodalom szerint mindig egy utólagos, páronkénti összehasonlító vizsgálatnak (post hoc Dunn-tesztnek) kell követnie [29].

2.2 Ipari mérések és a CT technológia

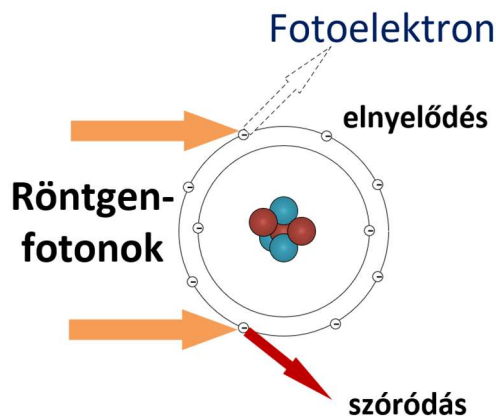
2.2.1 A röntgentomográfia alapelve és a berendezés felépítése

A komplex belső és külső geometriával rendelkező alkatrészek méret- és alakellenőrzése a modern ipar egyik kulcsfontosságú kihívása. Erre a feladatra kínál egyedülálló megoldást a röntgentomográfia (X-ray Computed Tomography, XCT), amely egy roncsolásmentes, háromdimenziós (3D) képalkotó eljárás. Az eredetileg az 1970-es években az orvostudományban, majd az 1980-as évektől az anyagvizsgálatban és a roncsolásmentes tesztelésben alkalmazott technológia 2005 óta egyre nagyobb teret hódít a kvantitatív ipari alkalmazásokban, különösen a mértékhiteles minőség-ellenőrzés területén [30, 31, 32].

A röntgensugárzás anyagban való elnyelődése alapvetően két fő mechanizmuson keresztül történik: a fotoelektromos abszorpción és a Compton-szóródáson (1.ábra). A fotoelektromos hatás

során a beérkező röntgenfoton teljes energiáját átadja egy atom belső héján lévő, kötött elektronnak, amelyet fotoelektronként kilök a helyéről. Ez a folyamat alacsonyabb energiatartományban és magas rendszámú anyagokban domináns. Ezzel szemben a Compton-szóródás egy rugalmatlan szóródási folyamat, ahol a foton energiájának csak egy részét adja át egy lazán kötött elektronnak, miközben iránya és energiája is megváltozik, ami a közepes és magas energiatartományban (>100 keV) válik jelentőssé. E két folyamat együttesen határozza meg az anyagok sugárgyengítési együtthatóját, ami kulcsfontosságú az olyan ipari alkalmazásokban, mint a roncsolásmentes anyagvizsgálat [33, 34].

Az XCT egy olyan képalkotó módszer, amely egy tárgyon áthaladó röntgensugárzás gyengülését méri, majd számítógépes algoritmusok segítségével rekonstruálja a tárgy belső szerkezetének kétdimenziós (2D) keresztmetszeti képeit vagy háromdimenziós (3D) modelljét, beleértve a rejtett geometriákat is [35]. Legfőbb előnye a hagyományos tapintó vagy optikai mérőrendszerekkel szemben, hogy egyetlen mérés során képes a munkadarab teljes külső és belső geometriáját leképezni, miközben egyidejűleg anyaghibák detektálására is lehetőséget nyújt [36].



1. ábra: A röntgenfotonok kölcsönhatása az atomokkal

Az ipari minőség-ellenőrzésben használt, kompakt (saját árnyékolással rendelkező) XCT rendszerek leggyakoribb felépítése három fő komponensből áll: egy röntgencsőből (sugárforrás), egy forgatható tárgyasztalból és egy detektorból.

- **Röntgencső (Sugárforrás):** a röntgensugarakat egy hevített katódos röntgencső állítja elő. A csőben egy volfrámszálból készült katódot elektromos árammal fűtenek, ami a termikus emisszió jelensége és a feszültségkülönbség révén szabad elektronokat bocsát ki. Ezeket az elektronokat egy nagyfeszültségű térben felgyorsítják, és egy céltárgyba csapódnak. Elektromágneses lencsék fókuszálják az elektronsugarat egy kis méretű fókuszfoltba. Az

elektronok energiájának mindössze 1%-a alakul át röntgenfotonokká, a fennmaradó 99% hővé, ezért a céltárgy aktív hűtése elengedhetetlen a stabil működéshez.

- Forgatható tárgyasztal: a vizsgálandó munkadarabot erre a precíziós asztalra helyezik, amely a sugárforrás és a detektor között található. A mérés során az asztal meghatározott szöglépésekkel körbefordul, lehetővé téve, hogy a tárgyról számos különböző irányból készüljenek felvételek.
- Detektor: a tárgyon áthaladó, meggyengült röntgensugárzást egy detektor érzékeli. Az ipari rendszerekben leggyakrabban síkpanel-detektorokat alkalmaznak, amelyek egy szcintillációs rétegből (ez a röntgensugárzást látható fénné alakítja) és egy azt érzékelő fotodióda mátrixból állnak. A detektor a beérkező sugárzás intenzitását méri, és egy digitális, kétdimenziós képpé, azaz projekcióvá alakítja.

Az XCT mérés egy többlépcsős folyamat, amely a projekciós képek elkészítésétől a 3D modell rekonstrukcióján át a felületmeghatározásáig tart.

A folyamat első lépése a tárgyról készült nagyszámú (több száz vagy ezer) 2D-s röntgenkép, ún. projekció rögzítése. A tárgyat a forgóasztalon körbeforgatva minden egyes szögpozícióban egy-egy projekciós kép készül. A röntgensugarak áthatolnak a tárgyon, és közben a sugárzás intenzitása csökken. Ez a gyengülés (attenuáció) a tárgy anyagától, sűrűségétől és vastagságától függ. A jelenséget a Beer-Lambert törvény írja le, melynek részletesebb fizikai hátteréről többek között a [31, 37, 38, 39] hivatkozásokban lehet olvasni. A gyengült sugárzás intenzitása az L úthossz után:

$$I(L) = \int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\int_0^L \mu(E,x) dx} dE \quad (2)$$

ahol:

$I(L)$ a gyengült sugárzás intenzitása L úthossz után,

$I_0(E)$ a kezdeti sugárzás intenzitása az E fotonenergián,

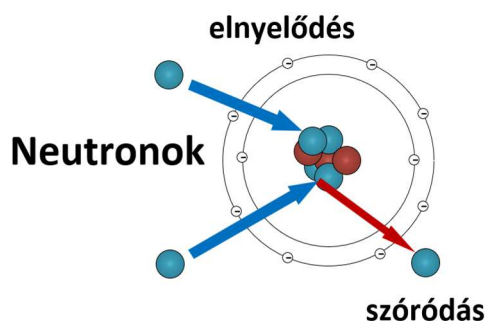
$\mu(E, x)$ az energiafüggő gyengülési együttható az x pozícióban.

A detektor által rögzített kép egy árnyékkép, ahol a sötétebb területek nagyobb, a világosabbak pedig kisebb sugárgyengülést jeleznek.

2.2.2 A neutrontomográfia és a berendezés felépítése

Az NCT egy roncsolásmentes képalkotó eljárás, amely a XCT-hez hasonló elveken alapul, de a képalkotáshoz röntgensugarak helyett neutronokat használ [40, 41]. A két technológia közötti alapvető különbség a sugárzás és az anyag közötti kölcsönhatásban van. Míg a röntgensugarak az atomok elektronfelhőjével lépnek kölcsönhatásba, addig a neutronok – mivel nincs töltésük – közvetlenül az atommagokkal (2. ábra), ami egyedi és az XCT-t kiegészítő képalkotási lehetőségeket teremt [41, 42].

A neutronok ezen tulajdonságának köszönhetően rendkívül jól áthatolnak a nagy rendszámú, sűrű fémeken (pl. acél, ólom, volfrám), amelyeken a röntgensugarak már kis vastagság esetén is jelentősen elnyelődnek [43]. Ezzel szemben a neutronok rendkívül érzékenyek bizonyos könnyű elemekre, különösen a hidrogénre, valamint a lítiumra, bórra és gadolíniumra [40, 44]. Ez a tulajdonság teszi a neutrontomográfiát ideális eszközzé olyan ipari és tudományos alkalmazásokban, ahol fémalkatrészek belsejében kell kis mennyiségű hidrogéntartalmú anyagokat (pl. víz, olaj, ragasztók, polimerek) vagy azok eloszlását kimutatni [40, 45, 46]. A módszer lehetővé teszi a vizsgált objektum belső szerkezetének háromdimenziós feltérképezését rejtett hibák, például repedések, pórusok vagy zárványok azonosításával együtt [41].



2. ábra: A neutronsugárzás kölcsönhatása az atomokkal

Az ipari NCT rendszerek felépítése nagyban hasonlít az XCT berendezésekéhez, de a neutronforrás és a detektor jellege alapvetően eltérő. A fő komponensek a neutronforrás, a kollimátor, a forgatható tárgyasztal és a neutrontetektor.

A neutronforrás esetében a jó minőségű tomográfiai képekhez nagy intenzitású, stabil neutronnyaláb szükséges, amelyet leggyakrabban kutató-atomreaktorok vagy spallációs neutronforrások biztosítanak [40, 47]. Ezek a létesítmények képesek a legtöbb ipari alkalmazáshoz megfelelő, moderált termikus (lassú) neutronokat generálni. A forrásból kilépő neutronokat egy nyalábcsőn keresztül vezetik a mérőállomásra. A kollimátor és árnyékolás tekintetében, míg az

ipari XCT rendszerek gyakran kúpsugaras geometriát alkalmaznak, az NCT-ben a párhuzamosított (vagy kvázi-párhuzamos) nyaláb használata az elterjedt [40, 41]. A nyaláb párhuzamosítását egy kollimátorral érik el, amely egy hosszú cső, aminek a belseje neutronelnyelő anyaggal (pl. bórral) van bevonva. A kollimátor minőségét a geometriai élességet meghatározó L/D arány (a kollimátor hosszának és bemeneti apertúrája átmérőjének aránya) jellemzi. A nagyobb L/D arány jobb párhuzamosítást és élesebb képet eredményez, de csökkenti a neutronfluxust [40, 48]. A megfelelő árnyékolás elengedhetetlen a szórt neutronok és a kísérő gammasugárzás kiszűrésére.

A vizsgálandó mintát egy precíziós, léptetőmotorral hajtott forgatható tárgyasztalra helyezik. A mérés során az asztal 180° -ot vagy 360° -ot fordul körbe meghatározott szöglépésekkel, miközben a rögzített neutronforrás és detektor között helyezkedik el [40].

A detektor egy szintén kulcsfontosságú elem, mivel a neutronok töltés nélküli részecskék, így közvetlenül nem képesek atomokat ionizálni, ezért detektálásukhoz egy konverteranyagra van szükség, amely a neutronokat detektálható másodlagos sugárzássá alakítja [49]. A modern digitális neutrontektorok legfontosabb eleme a szcintillációs ernyő. Ez az ernyő jellemzően két fő komponens poralapú keveréke: egy neutronelnyelő konverter anyag (pl. lítium-6 izotópban dúsított lítium-fluorid, ${}^6\text{LiF}$, vagy gadolínium-oxid-szulfid terbiummal aktiválva, $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$) és egy szcintillátor (fénykibocsátó) anyag (pl. cink-szulfid, ZnS) [49]. A detektálási folyamat úgy zajlik, hogy a beérkező neutron elnyelődik a konverter anyag atommagjában, majd a neutronbefogási reakció során nagy energiájú, ionizáló töltött részecskék (pl. a ${}^6\text{Li}$ esetén alfa-részecske és triton) keletkeznek. Ezek a részecskék a szcintillátor anyagban fénykibocsátást (felvillanást, szcintillációt) gerjesztenek. Végül a kibocsátott látható fényt egy tükör és egy nagy fényerejű lencserendszer segítségével egy nagy érzékenységű, alacsony zajszint érdekében mélyhűtött CCD vagy sCMOS kamera rögzíti egy fényzáró dobozon belül [49].

2.2.3 Tomográfiás képfeldolgozás

A tomográfia, más néven rétegfelvétel, egy olyan képalkotó eljárás, mely a vizsgálati darabot teljes térfogatában leképezi. Ehhez a képalkotási módszerhez szükséges egy olyan sugárzás, ami áthatol a vizsgálati darabon, megfelelő mértékben elnyelődik abban, és az így keletkező elnyelődési vagy projekciós képet egy rögzítő eszköz detektálja. A vizsgálati darab projekciós képe egy detektorra vagy valamilyen detektáló rendszerre vetül, ahol digitális, pixelekből álló kép keletkezik. A tomográfiás térfogati, voxelekből álló kép oly módon jön létre, hogy a vizsgálati darabról mozgatható rögzített projekciós képeket egy szoftver háromdimenziós (3D) voxeltérfogattá rekonstruálja. A leggyakrabban alkalmazott mozgatható forma a forgatás. A forgatás

relatív, létezik olyan tomográfiás berendezés, aminél a vizsgálati darabot forgatják, és olyan is, ahol a sugárforrás és a detektor forog a vizsgálati darab körül.

A roncsolásmentes anyagvizsgálatban többféle sugárzást használnak tomográfiás felvételek készítéséhez. Ilyen például az örvényáram-tomográfia, a transzmissziós-ultrahangtomográfia, a terahertzes tomográfia, az optikai (infravörös) koherenciatomográfia, a röntgentomográfia és a neutrontomográfia. Ezen eljárások többsége azonban specifikus korlátokkal rendelkezik: az örvényáram-tomográfia penetrációs mélysége kicsi és csak elektromosan vezető anyagoknál alkalmazható; az ultrahangtomográfiánál a visszhangok okozhatnak problémát; a terahertzes tomográfia behatolási mélysége mindössze pár száz nanométer; az optikai koherenciatomográfiát pedig csak a felhasznált fény számára átlátszó anyagoknál lehet alkalmazni [36]. Az ipari roncsolásmentes és dimenzionális vizsgálatok szempontjából kétféle sugárzásnak van megfelelő tulajdonsága: a röntgen- és a neutronsugárzásnak.

Az XCT egy roncsolásmentes eljárás, amely az elmúlt évtizedekben a minőség-ellenőrzés és az anyagtudomány nélkülözhetetlen eszközévé vált. Az ipari környezetben két fő funkciót tölt be. Egyrészt a roncsolásmentes anyagvizsgálat (Non-Destructive Testing, NDT) területén alkalmazzák, ahol lehetővé teszi a komplex összeállítások belső szerkezetének vizsgálatát fizikai beavatkozás nélkül. Ezzel azonosíthatók a rejtett szerkezeti hibák, zárványok vagy porozitások, amelyek befolyásolhatják a termék megbízhatóságát és élettartamát [50].

Az XCT technológia különösen az additív gyártással (AM) készült alkatrészek vizsgálatában bizonyul előnyösnek. Míg a hagyományos mérési módszerek, mint a koordináta-mérőgépek (CMM) vagy az optikai szkennerek, nem képesek a belső üregek, alámetszett felületek vagy komplex rácsszerkezetek mérésére, az XCT áthatoló sugárzása révén teljes térfogati képet szolgáltat a vizsgált darabról [51].

Bár az XCT számos előnnyel rendelkezik, a többkomponensű, különösen eltérő sűrűségű alkatrészek mérésekor jelentős kihívások merülnek fel. A mérési pontosságot nagyban befolyásolja, ha a vizsgált összeállításban jelentősen eltérő röntgensugár-elnyelési (attenuációs) tulajdonságokkal rendelkező anyagok vannak. Az eltérő sűrűségű anyagok határfelületén fellépő fizikai jelenségek, mint a sugárkeményedés (beam hardening) és a szóródás, torzíthatják a képet és megnehezítik a felületek pontos meghatározását [52, 53, 54].

Bár az XCT számos előnnyel rendelkezik, a többkomponensű, eltérő sűrűségű alkatrészek mérésekor jelentős kihívások merülnek fel. A mérési pontosságot nagyban befolyásolja, ha a vizsgált összeállításban jelentősen eltérő röntgensugár-elnyelési tulajdonságokkal rendelkező

anyagok vannak. Az eltérő rendszámú anyagok határfelületén fellépő fizikai jelenségek, mint a sugárkeményedés és a szóródás, nem csak összeadódnak, hanem nemlineáris kölcsönhatásba lépnek, ami felerősíti a műtermékeket, ezzel nehezítve a kvantitatív kiértékelést [55].

A sugárkeményedés (beam hardening) akkor lép fel, amikor a polikromatikus (széles energiaspektrumú) röntgennyaláb áthalad egy anyagon. Az alacsonyabb energiaszintű fotonok nagyobb valószínűséggel nyelődnek el, mint a magasabb energiaszintűek, aminek következtében a nyaláb átlagos energiaszintje megnő, azaz "felkeményedik". Ez a jelenség sérti a CT-rekonstrukció alapjául szolgáló Beer–Lambert-törvény linearitási feltételezését, ami olyan műtermékekhez vezet, mint a "cupping" effektus (a homogén objektumok közepének sötétebbé válása) és a nagy sűrűségű anyagok környezetében megjelenő sötét és világos sávok (streaking) [56].

Ezzel szemben a szóródás a röntgenfotonok eredeti pályájukról való eltérülését jelenti, amelyet elsősorban a Compton- (rugalmatlan) és Rayleigh- (rugalmas) szóródási kölcsönhatások okoznak [27]. Míg a Rayleigh-szórás alacsony energiákon és nagy rendszámú anyagoknál játszik szerepet, a diagnosztikai és ipari CT energiatartományában a Compton-szórás a domináns. A keletkező, széles szögben eltérülő fotonok a detektor teljes felületén egyfajta zajfátylat hoznak létre. Ez csökkenti a képkontrasztot, növeli a zajt és egyéb torzításokat okoz, ami rontja a képminőséget és a méretepontoságot [57].

A két jelenség együttes, szisztematikus hatása különösen a nagy rendszámkülönbségű anyagok (pl. műanyag és fém) határfelületén kritikus. A nagy rendszámú fém jelenléte két módon is rontja a helyzetet: egyrészt intenzívebb sugárkeményedést okoz, másrészt a határfelületén a szóródás mértéke is megnövekszik. A fémről szóródó fotonok elárasztják a szomszédos, alacsonyabb sűrűségű polimer területét a detektoron, drasztikusan lerontva annak kontrasztját és megnehezítve a pontos felület-meghatározást. Ez a nemlineáris kölcsönhatás felerősíti a sávosságú műtermékeket és lokális CT-szám eltolódásokat okoz a határfelület mentén, ami messze meghaladja a két hiba külön-külön okozott hatását [55, 58]. Ezen összetett műtermékek kezelésére integrált korrekciós eljárások szükségesek, melyek a fizikai modelleket (pl. iteratív rekonstrukció, duál-energiás módszerek) ötvözik a legújabb, mesterséges intelligencián alapuló, adatalapú megoldásokkal [59].

A helyzetet tovább bonyolítja, ha az eltérő anyagok között légrés található. Ezek a légrések képi hibákat okozhatnak, különösen az anyagok találkozási határfelületein [60]. A fém-polimer összeállítások vizsgálata során kimutatták, hogy a fém jelenléte befolyásolja a polimer felületek

detektálásának pontosságát. A nagy sűrűségű fémek, mint az acél, erős zajt és műtermékeket okozhatnak, míg az alacsonyabb sűrűségű alumínium hatása mérsékeltebb [61].

Az XCT mérések pontossága és megbízhatósága alapvetően függ a tomográfiai felvétel képminőségétől. A képminőség értékelésére alkalmazott metrikák a jel-zaj arány (Signal to Noise Ratio, SNR) és a kontraszt-zaj arány (Contrast-to-Noise Ratio, CNR) [62]. Ezek a mutatók közvetlen kapcsolatban állnak a metrológiai pontossággal és a mérési bizonytalansággal, mivel azt fejezik ki, hogy a rendszer mennyire képes a vizsgált struktúrákat a háttérzajtól, illetve az eltérő anyagi tulajdonságú régiókat egymástól megkülönböztetni. A CNR különösen kulcsfontosságú a többkomponensű rendszerek esetében, ahol az eltérő attenuációs tulajdonságú anyagok elkülönítése a cél [63]. A magasabb SNR és CNR értékek általában jobb mérési pontosságot és kisebb mérési bizonytalanságot eredményeznek, mivel a jobb minőségű kép és az élesebb kontraszt megkönnyíti az élek pontos detektálását és a felületmeghatározást [64].

Az SNR a jel erősségének és a zaj szórásának arányát írja le, és a következő képlet alapján számítható:

$$SNR = \frac{\bar{G}}{\sigma} \quad (3)$$

ahol $\bar{G}$ a vizsgált térfogatban mért szürkeségi értékek átlaga, σ pedig azok szórása. Ezzel szemben a CNR két különböző anyag vagy régió közötti kontrasztot viszonyítja a zajhoz, és anyagpáronként határozható meg. Az egyanyagú (SM) szkennelések során a vizsgálati térfogatban jellemzően két régió különíthető el: a vizsgált darab anyaga és a környező levegő. A többanyagú (MM) méréseknél, mint például a levegő, alumínium és műanyag együttes jelenlétének, a CNR értékét páronként szükséges kiszámítani a következő egyenlettel [65] szerint:

$$CNR = \frac{2(\bar{G}_a - \bar{G}_b)}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \quad (4)$$

ahol $\bar{G}_a$ és $\bar{G}_b$ az a és a b anyag átlagos szürkeségi értékét és σ_a és σ_b a hozzájuk tartozó szórást jelenti.

A képminőség és ezen keresztül a metrológiai megbízhatóság optimalizálásához elengedhetetlen a szkennelési paraméterek, mint például a voxelméret, a detektor pixelegyesítése, az expozíciós idő vagy a csőfeszültség, szisztematikus beállítása [62, 65]. Több különböző anyagból álló alkatrészek mérésénél a metrológiai pontosság kulcsa az anyagi határfelületek precíz meghatározása, amelyhez elengedhetetlen a magas CNR. A modern, fejlett rekonstrukciós

algoritmusok, mint az iteratív (IR) vagy a mélytanuláson alapuló (DLIR) eljárások, a hagyományosabb szűrt visszavetítéshez (FBP) képest jelentősen csökkentik a zajt, ezzel növelve a CNR értékét [66, 67]. A jobb kontraszt pontosabb él- és felületmeghatározást tesz lehetővé. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy ezek az algoritmusok megváltoztathatják a zaj textúráját és térbeli eloszlását. Emiatt egy magasabb CNR érték önmagában nem feltétlenül jelent arányosan jobb mérési pontosságot, mivel a módosult zajkarakterisztika befolyásolhatja a felületmeghatározó algoritmusok működését [68]. A megbízható eredmények érdekében tehát a teljes képalkotási és kiértékelési folyamat együttes, feladatspecifikus optimalizálása szükséges.

A különböző szögekből rögzített 2D projekciók sorozatából egy matematikai eljárás, a rekonstrukció segítségével állítják elő a tárgy 3D modelljét. Az algoritmusok az inverz Radon-transzformáción alapulnak, amelyek a projekciók alapján visszaszámolják a tárgy belső sűrűségeloszlását. A legelterjedtebb rekonstrukciós algoritmus az ipari CT alkalmazások során a szűrt visszavetítés (Filtered Back-Projection, FBP), illetve annak kúp-sugar geometriára kiterjesztett változata, a Feldkamp-Davis-Kress (FDK) algoritmus [69]. A rekonstrukció eredményeként egy háromdimenziós, diszkrét térfogatelemekből álló modell jön létre. Iteratív rekonstrukciós algoritmusokat, mint például a *Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique* (SART) is alkalmaznak, főként a metrológiai CT berendezéseknél, ahol a nagy pontosság kiemelten fontos. A SART előnye az FDK-val szemben a jobb képminőség, valamint jelentősen jobban kezeli a hiányos adatokból fakadó műtermékeket [70]. Ez pontosabb térfogati képet eredményez, ami az ipari méréseknél elengedhetetlen [71].

Metrológiai szempontból fontos, hogy megfelelő számú, jellemzően 600 és 2000 közötti projekciós kép rendelkezésre állása esetén mind az analitikus FDK, mind az iteratív SART, illetve OS-SART algoritmus képes szubvoxeles pontosságot elérni a dimenzionális méréseknél [36, 71, 72]. A két eljárás közötti metrológiai különbség elsősorban a nem ideális mérési körülmények között mutatkozik meg. A rendkívül gyors és stabil analitikus FDK eljárás [71] mérési pontossága a vetületszám csökkenésével, különösen 600 projekció alatt, gyorsan leromlik [36], és a zaj, valamint a sugárkeményedési műtermékek miatt jelentős alakhibák, például a hengeresség vagy a síklapúság torzulása lép fel a rekonstruált térfogatban [73]. Ezzel szemben a lényegesen számításigényesebb és a paraméterezésre is érzékeny iteratív SART és OS-SART algoritmusok [72] a kiváló zaj- és műtermék-korrektúrájuknak köszönhetően kevesebb vetületszám mellett is képesek megőrizni a szubvoxel pontosságot [71, 72]. Bár a modern, mélytanulás-alapú eljárások képesek még ennél is kevesebb, akár 20–100 projekcióból is rekonstruálni a térfogatot [74, 75],

metrológiai alkalmazásuk a szabványosítás hiánya [76] és a geometriai torzítások kockázata miatt jelenleg korlátozott.

A rekonstruált 3D modell nem folytonos, hanem apró, kocka alakú térfogatelemekből, úgynevezett voxelekből (volume pixel) épül fel. Minden egyes voxelhez a rekonstrukciós algoritmus egy szürkeségi értéket rendel, amely arányos az adott térfogatelemben bekövetkezett átlagos röntgensugár-gyengüléssel, vagyis a tárgy lokális sűrűségével [31]. A voxelek összessége alkotja a tárgy teljes digitális térfogati képét, amely a külső és belső struktúrákat egyaránt tartalmazza. A voxel mérete meghatározza a térfogati kép felbontását.

A rekonstrukcióval kapott voxeltérfigat még nem alkalmas közvetlen méret- és alakellenőrzésre, mivel az csak egy sűrűségeloszlást reprezentál. A következő lépés a szegmentáció, amely során a szoftver a szürkeségi értékek alapján megkeresi a határokat a tárgy anyaga és a környező levegő (vagy egy másik anyag) között.

A szegmentációt követően *marching cubes* algoritmussal létre kell hozni a felületet (ez a felületmeghatározás vagy *surface determination*), amely már nem szükséges az anyagvizsgálatokhoz, de elengedhetetlen a metrológiai, 3D mérés technikai vizsgálatokhoz. Ebből a felületből már létre lehet hozni egy STL fájlt (háromszöghálós felületmodell), amit koordinátamérés technikai szoftverben kiértékelhetünk.

A rekonstrukcióval kapott voxeltérfigat metrológiai felhasználásának kritikus lépése a szegmentáció, amely a vizsgálati darab anyagát a környező levegőtől (vagy más anyagtól) elválasztó határfelület digitális leképezését jelenti. Ennek leggyakoribb módja a szegmentáció, azaz a küszöbölési eljárások alkalmazása, amelyek a voxelek szürkeségi értékei alapján különítik el a különböző fázisokat. Az ipari CT-mérés technika két alapvető megközelítést alkalmaz: a globális és a lokális adaptív küszöbölést.

A leggyakoribb módszer a globális küszöbérték-meghatározás, például az ISO-50% módszer vagy az Otsu-algoritmus [77], ahol a szoftver egyetlen szürkeérték-küszöböt határoz meg a levegő és az anyag közötti átmenetnek. Léteznek lokálisan adaptív küszöbölési algoritmusok is, amelyek a szürkeérték-gradiensek kiértékelésén alapulnak [78, 79]. Ennek elméleti alapja az, hogy a CT-képképzés során fellépő fizikai hatások miatt az anyag-levegő határfelületen a szürkeségi értékek nem ugrásszerűen, hanem egy átmeneti zónán keresztül változnak. Az ISO-50% módszer matematikailag ezt az átmenetet modellezi, és a küszöbértéket a két fázis (pl. objektum és háttér) átlagos intenzitásának különbségéhez képest 50%-nál határozza meg. Ez a pont képviseli a legnagyobb pontossággal a valódi geometriai határvonalat, kompenzálva a képképző rendszer

pontszórási függvénye által okozott elmosódottságot. Bár az eljárás homogén, nagy kontrasztú régiókban robusztus eredményt ad, fontos kiemelni, hogy az optimális küszöbérték függ a szkennerek hardveres felépítésétől, a rekonstrukciós algoritmustól és a mérési protokolltól, ezért rendszerfüggő kalibrációt igényel [80].

Ezzel szemben a lokális adaptív küszöbölési eljárások nem egyetlen globális értéket használnak a teljes térfogatra, hanem dinamikusan, minden egyes voxel vagy régió környezetének statisztikai jellemzői (pl. lokális átlag, medián, szórás) alapján határozzák meg a küszöböt [81, 82, 83]. Ez a megközelítés különösen hatékony inhomogén anyagoknál, egyenetlen sűrűségeloszlású vagy zajos, műtermékekkel terhelt képek esetén, ahol a globális küszöbérték nem adna pontos eredményt. Az adaptív módszerek jobban ellenállnak a képminőség-ingadozásoknak, így megbízhatóbb szegmentációt tesznek lehetővé komplex ipari alkatrészek esetében is [81].

Azonban mindkét eljárás pontosságát és a mérési eredmény megbízhatóságát számos bizonytalansági tényező befolyásolja. Ezek a tényezők a képalkotási és kiértékelési lánc több pontján is megjelenhetnek. A legfontosabb források közé tartozik a képzaj (elektronikai zaj, fotonstatisztika), a hardveres instabilitás (pl. mechanikai rezgések, hőmérséklet-ingadozás), a detektorspecifikus hatások (pl. pixel áthallás), valamint maguk a rekonstrukciós algoritmusok által generált műtermékek [84, 85].

A röntgentomográfia egy rendkívül sokoldalú technológia, amely alapjaiban változtatja meg a minőség-ellenőrzési és metrológiai gyakorlatot. Képessége a belső struktúrák roncsolásmentes, nagy felbontású leképezésére elengedhetetlenné teszi komplex, többek között additív eljárásokkal készült alkatrészek vizsgálatában. A többkomponensű rendszerek mérésekor felmerülő kihívások a szkennelési paraméterek gondos optimalizálását és a képminőségi metrikák tudatos alkalmazását igénylik. Az XCT-adatokra épülő visszacsatolásos kompenzációs módszerek pedig új lehetőségeket nyitnak a gyártási folyamatok pontosságának növelésében, hozzájárulva a magasabb minőségű és megbízhatóbb termékek előállításához.

Az NCT mérési folyamata megegyezik az XCT-nél leírtakkal, és a projekciók rögzítéséből, a 3D rekonstrukcióból és a felületmeghatározásból áll. Az eljárás matematikai alapjait a tomográfia általános elmélete írja le [86, 87].

2.2.4 Dimenzionális mérések és NDT

Az ipari röntgentomográfia két fő alkalmazási területe a roncsolásmentes anyagvizsgálat (*Non-Destructive Testing*, NDT) és a dimenzionális metrológia. Bár mindkét terület ugyanazon a

technológiai alapon nyugszik, céljaik, módszertanuk és a velük szemben támasztott követelmények alapvetően eltérnek. A legfőbb különbség az, hogy míg a dimenzionális metrológiában a metrológiai visszavezethetőség és a mérési bizonytalanság minimalizálása a kulcsfontosságú szempont, addig az NDT esetében a detektálhatóság és a képminőség a meghatározó [22, 88, 89, 90].

Az NDT alkalmazások elsődleges célja a térfogatjellegű anyagfolytonossági hibák és a belső szerkezeti integritás vizsgálata anélkül, hogy a vizsgált alkatrész sérülne. A fókuszban olyan hibák azonosítása áll, mint a repedések, zárványok, porozitás vagy anyagszerkezeti hibák [89, 91]. Az NDT tehát egy kvalitatív eljárás, amely arra a kérdésre keresi a választ, hogy a termék megfelel-e a szerkezeti követelményeknek, és tartalmaz-e rejtett, kívülről nem látható hibákat. Olyan iparágakban, ahol az anyagok integritása kritikus a biztonság és a teljesítmény szempontjából – például a gyártásban, az építőiparban vagy az akkumulátorgyártásban –, az XCT elengedhetetlen a rejtett hibák feltárásához. Az akkumulátorcellák esetében például a feltekercselt elektródalapok túlnyúlásának vagy a lapok közötti szennyeződéseknek a vizsgálata kulcsfontosságú biztonságtechnikai szempontból. Az NDT-re optimalizált XCT rendszerekkel szemben támasztott követelmények a képminőségre (kontraszt, felbontás, jel-zaj viszony) összpontosítanak, hogy a lehető legkisebb hibák is megbízhatóan detektálhatók legyenek.

Ezzel szemben a dimenzionális metrológia célja az alkatrészek geometriai jellemzőinek, méreteinek és tűréseinek precíz, kvantitatív meghatározása [22, 92]. Itt a fókusz a felületek és élek pontos pozíciójának meghatározásán van, annak érdekében, hogy az alkatrészek megfeleljenek a tervezési előírásoknak. Olyan területeken, mint a repülőgép- és autóipar, ahol a komponenseknek szigorú tűréseknek kell megfelelniük, ez a fajta mérés elengedhetetlen [92, 93]. A koordináta-mérésekhez használt XCT rendszereknek biztosítaniuk kell a metrológiai visszavezetettséget, amit a gép rendszeres, etalonokkal történő kalibrálásával és a mérési bizonytalanság meghatározásával érnek el [22, 88, 94]. A cél nem csupán a képalkotás, hanem egy visszavezetett, megbízható mérési eredmény szolgáltatása.

A két eltérő célrendszer közvetlenül befolyásolja a metrológiai alkalmazásokra alkalmas XCT berendezések felépítését és hardverkomponenseit. A mechanikai stabilitás és precizitás tekintetében a metrológiai feladatokra használt gépeknek rendkívül stabilnak kell lenniük; gyakran rezgéscsillapítással ellátott gránitágyra épülnek, precíziós mozgatórendszerrel és nagy pontosságú útmérőkkel rendelkeznek, míg az NDT-re alkalmas gépeknél a precíziós manipulátor rendszer és az útmérők alkalmazása nem elsődleges szempont. A környezeti feltételek is fontosak,

mivel a dimenzionális mérések pontosságát a hőmérséklet-ingadozás jelentősen befolyásolhatja, ezért a metrológiai rendszereket temperált környezetben kell elhelyezni, és gyakran hőmérséklet-kompenzációval is ellátják őket, ami az NDT vizsgálatoknál jellemzően nem követelmény. A röntgenforrás is eltérő lehet, míg a metrológiai XCT rendszerek a részletgazdagság maximalizálása érdekében jellemzően nyitható, mikrofókuszos röntgensöveket használnak, amelyek élesebb képet eredményeznek, addig az NDT rendszerek gyakran nagyobb teljesítményű, makrofókuszos zárt csövekkel vannak szerelve, amelyek jobb áthatolóképességet biztosítanak, de alacsonyabb geometriai felbontás mellett.

Míg a dimenzionális mérés és a roncsolásmentes vizsgálat ugyanazt a tomográfias technológiát használja, céljaik, módszereik és a velük szemben támasztott követelmények jelentősen eltérnek. Az NDT a minőségi és biztonsági kérdésekre fókuszál a hibák detektálásán keresztül, míg a dimenzionális metrológia a mennyiségi adatokra, a specifikációknak való megfelelés igazolására összpontosít. Az alkalmazási területtől függően a két módszer közötti választás alapvetően befolyásolja a minőség-ellenőrzési folyamatokat és a technológiai beruházásokról szóló döntéseket [88, 90]. Az XCT rendszerek egyedülálló képessége, hogy egyetlen berendezéssel mindkét feladat elvégezhető, rendkívül hatékonyá teszi azokat olyan iparágakban, ahol egy alkatrészen mind dimenzionális méréseket, mind zárványvizsgálatot is kell végezni. Ugyanakkor fontos megjegyezni a technológia korlátait is: a nagy rendszámú és sűrű anyagokból készült tárgyak vizsgálata kihívást jelenthet, és gyakran csak kis méret esetén lehetséges. A technológia fejlődése, mint a nagyobb felbontás és a gyorsabb szkennelési idők, folyamatosan javítja mind a dimenzionális mérés, mind az NDT képességeit [95].

Bár mindkét terület ugyanazon a háromdimenziós röntgenképalkotáson alapul, a vizsgálat célja, a berendezések stabilitása és a szoftveres kiértékelés szempontjából éles elméleti határvonalat kell húzni a két eljárás között [96]. Az NDT során a hibakeresésen van a hangsúly. Itt a képalkotást és a szoftveres beállításokat úgy optimalizálják, hogy a belső anyaghibák – például a gázzárványok vagy repedések – a lehető legnagyobb kontraszttal különüljenek el a környezetüktől [97]. Ezzel szemben a metrológiai XCT elsődleges célja a méretpontosság és a visszavezethetőség. Ennél az eljárásnál a kulcskérdés az alkatrész kontúrjának szubvoxel pontosságú, matematikai meghatározása, valamint a mérési bizonytalanság precíz számszerűsítése [98, 31]. Ez az elméleti különbség a berendezések fizikai felépítését is alapjaiban határozza meg. Míg az NDT-nél a munkadarab könnyű és gyors mozgathatósága, valamint a rövid mérési idő a legfontosabb, addig a metrológiai rendszerek rendkívül merev mechanikai szerkezetet (például precíziós forgóasztalt), szigorúan szabályozott hőmérsékletű környezetet, és a röntgenső fókuszfolt-vándorlását aktívan

ellensúlyozó rendszert igényelnek a méreteltérések elkerülésére [99, 100]. Emiatt a metrológiai XCT-k pontosságát nem egyszerű képminőség-tesztekkel ellenőrzik, hanem szabványok (például a VDI/VDE 2630 irányelv) alapján, kalibrált etalonok segítségével biztosítják a közvetlen visszavezethetőséget az SI métegegységhez [101].

2.2.5 A röntgentomográfiás rendszerek vizsgálatához használt etalonok

Az XCT mérőrendszerek esetében a metrológiai visszavezetetttség biztosítása speciális kihívásokat rejt, amelyek eltérnek a hagyományos koordináta-méréstechnika gyakorlatától. A legfőbb különbséget az jelenti, hogy a CT-mérés során a röntgensugárzásnak át kell hatolnia a vizsgált objektumon, ezért a hagyományos, jellemzően acélból készült, nagy sűrűségű etalonok alkalmazása korlátozott vagy teljesen lehetetlen a magas sugárzáselnyelési együtthatójuk miatt [102]. A nem megfelelő anyagsűrűség olyan képi hibákhoz vezethet, mint a sugárkeményedés vagy a szóródás, amelyek jelentősen torzítják a mérési eredményeket. Ezen kihívások kezelésére az XCT technológiához specifikus etalonokat fejlesztettek ki, amelyek anyaga, geometriája és kialakítása illeszkedik a technológia sajátosságaihoz.

Az XCT specifikus etalonok kulcsfontosságú jellemzője az alacsony röntgensugár-elnyelésű anyagok használata. A leggyakrabban alkalmazott anyagok közé tartoznak a könnyűfémek, mint az alumínium és titán ötvözetek, amelyek jó kompromisszumot kínálnak a mechanikai stabilitás és a sugárzásáteresztő képesség között. Emellett használnak speciális kerámiákat is, mint a szilícium-nitrid, szilícium-karbid vagy a szintetikus rubin, amelyek kiváló méret- és hőstabilitással rendelkeznek. Polimerek, például műszaki műanyagok alkalmazása különösen akkor indokolt, ha a mérendő munkadarabok is polimerből készülnek, bár hosszú távú méretstabilitásuk körültekintést igényel [103].

A geometriai stabilitás szempontjából kiemelkedő megoldást jelentenek a szénszál-erősítésű polimer (CFRP) vázszerkezetek, mivel rendkívül merevek és alaktartóak, ugyanakkor a röntgensugárzás számára nagymértékben átlátszóak [104]. Jó példát szolgáltatnak erre a szénszálcső szerkezetekre épülő etalonok, amelyeken nagy pontosságú, kalibrált referencia-gömbök helyezkednek el. Egy ilyen típus a XCT rendszerek geometriai hibáinak feltérképezésére és korrekciójára szolgál, míg egy másik, hasonló felépítésű etalon lehetővé teszi a munkadarabbal egyidejűleg történő szkennelést. Ez az egyidejű kalibrációs megközelítés biztosítja, hogy a mérés és a kalibráció azonos környezeti feltételek mellett történjen, így a hőmérséklet-ingadozásból vagy a berendezés stabilitásából eredő hibák hatása minimalizálható [105].

Az XCT technológia egyik legfontosabb képessége a belső, rejtett üregek és komplex csatornarendszerek mérése, melyek metrológiai visszavezethetősége jelenti a legnagyobb kihívást. Erre a problémára kínálnak innovatív megoldást a szétszerelhető etalonok, amelyeket precízen illeszkedő szegmensekből terveznek. A folyamat első lépése az etalon szétszerelése, majd a szegmensek belső és külső felületeinek referenciamérése egy nagy pontosságú tapintós koordináta-mérőgépen (CMM). Ezt követi az etalon precíziós illesztésekkel történő újra összeszerelése. Így az összeszerelt etalon már egy ismert és kalibrált belső geometriával rendelkező referenciatestként szolgál a CT mérések pontosságának ellenőrzéséhez. Kiváló példa erre egy miniatűr alumínium hengerfejből készült etalon, amelyet négy szegmensre vágtak szét, és a rajtuk elhelyezett referenciaelemek biztosítják a konzisztens koordináta-rendszert [106]. Hasonló elven működik egy olyan etalon is, amely kalibrált, félgömb alakú mesterséges hibákat tartalmaz a belsejében a porozitás mérésének pontosságának ellenőrzésére [107, 108].

A CT-mérések bizonytalanságának feladat-specifikus meghatározására az ipari gyakorlatban az egyik legelterjedtebb eljárás a helyettesítési módszer, amelyet az ISO 15530-3 szabvány részletez [109]. A módszer alapelve, hogy a mérési bizonytalanságot egy kalibrált etalon és a mérendő munkadarab méréseinek összehasonlításával becsülik. A módszer sikerének kulcsa a hasonlóság elve, ami kiterjed az anyagra, a geometriára és a felületi érdességre is. A munkadarabszerű etalonok felelnek meg leginkább ezeknek a kritériumoknak, mivel ezek gyakorlatilag a sorozatgyártásból kivett, majd egy nagyobb pontosságú módszerrel megmért és kalibrált alkatrészek. Ezen etalon mérése során ugyanazok a szisztematikus hibahatások érvényesülnek, mint a többi munkadarab esetében, így az eltérés felhasználható a mérések korrekciójára és a bizonytalanság becslésére [110]. Továbbá, ha egy alkatrész több, eltérő sugárelnyelésű anyagból áll, többféle anyagú etalonok alkalmazása válhat szükségessé a rendszer pontos kalibrálásához [110, 111].

A röntgentomográfiai mérőrendszerek metrológiai visszavezettségének megvalósítása elengedhetetlen a megbízható és pontos háromdimenziós mérésekhez. A technológia egyedi kihívásaira a speciálisan erre a célra kifejlesztett etalonok adnak választ. Az alacsony sugárelnyelésű anyagokból készült, a szétszerelhető vagy a munkadarabszerű etalonok, valamint a helyettesítési módszer szisztematikus alkalmazása lehetővé teszi a CT-mérések pontosságának és bizonytalanságának megbízható, feladat-specifikus meghatározását ipari környezetben is.

2.2.6 Röntgen- és neutrontomográfiával vizsgálható anyagok

A korábban részletezett, sugárgyengülésen alapuló képalkotási elv [31, 37] meghatározza, hogy a röntgentomográfia mely anyagtípusok vizsgálatára a legalkalmasabb. Az eljárás rendkívül sokoldalú, de hatékonysága az anyag sűrűségétől, rendszámától és a vizsgált jellemzők méretétől függ. A fém alkatrészek minőség-ellenőrzése az XCT egyik legfontosabb ipari alkalmazási területe, ahol a technológia képes kimutatni a belső anyagfolytonossági hibákat, például a porozitást, repedéseket vagy zárványokat öntvényekben és hegesztési varratokban [112], és elengedhetetlen az additív gyártással készült fém alkatrészek esetében [112]. Polimer alapú anyagok és kompozitok esetében az XCT lehetővé teszi a belső morfológia részletes elemzését, így vizsgálhatók a celluláris szilárd anyagok sűrűség- és póruseloszlása [113, 114], vagy az üvegszál-erősítésű kompozitokban a szálak orientációja. Az építőiparban használt anyagok, mint a beton vagy habarcs minőségének értékelésében is fontos szerepet játszik, betekintést nyújtva ezen anyagok mikrostruktúrájába, például a repedések hálózatának feltérképezésével [115, 116].

Az XCT ipari alkalmazhatóságát azonban több, közvetlenül a képalkotás fizikájából eredő tényező is korlátozza. Az egyik ilyen a felbontás, amelyet a röntgenső fókuszfoltjának mérete és a detektor technológiája limitál [117, 118]. A másik a behatolási mélység, mivel a röntgensugarak áthatolóképeségét alapvetően befolyásolja a vizsgált anyag sűrűsége és rendszáma, így a nagy sűrűségű fémek korlátozzák a vizsgálható darab méretét [119, 120]. Végül a kép kontrasztja a sűrűség- és összetételbeli különbségektől függ, ezért a hasonló sűrűségű anyagok nehezen különíthetők el egymástól [118, 121]. A technológiai fejlődés, például a kisebb fókuszfolttal rendelkező röntgenforrások és a nagyobb felbontású detektorok, folyamatosan javítja a képminőséget [122, 123].

A 2.2.2 alfejezetben leírt, egyedi neutron-atommag kölcsönhatásnak köszönhetően az NCT az XCT-t kiegészítő, speciális képalkotási lehetőségeket kínál. Az eljárás különösen alkalmas olyan anyagkombinációk elemzésére, amelyek röntgensugárzással nehezen vizsgálhatók. Az NCT egyik legfontosabb előnye a könnyűelemek, például a hidrogén, a lítium és a bór iránti különleges érzékenysége, ami kiemelkedően hasznossá teszi üzemanyagcellák és lítium-ion akkumulátorok vizsgálatában [124, 125]. Mivel a neutronok képesek áthatolni vastag, nehézfémekből készült tárgyakon is, lehetővé válik olyan komplex összeállítások vizsgálata, ahol kis mennyiségű könnyűelemeket kell detektálni nehézfémek jelenlétében [44, 126]. Az eljárás roncsolásmentes jellege lehetővé teszi komplex belső szerkezetek, például additív gyártással készült alkatrészek minőség-ellenőrzését is [127, 128].

Az NCT ipari alkalmazhatóságát ugyanakkor több tényező is korlátozza. Az anyagsűrűség és a méret befolyásoló tényező, mert bár a neutronok jól áthatolnak egyes nehézfémeken, a rendkívül vastag minták esetében a nyaláb jelentősen gyengülhet, így a vizsgálható méret általában néhány tíz centiméterre korlátozódik [129, 130, 131]. Az elem-szelektivitás is korlát lehet, mivel előfordulhat, hogy a nehezebb elemek között nem nyújt elegendő kontrasztkülönbséget [124, 126]. Jelentős nehézséget jelent a neutronforrások korlátozott elérhetősége és száma, valamint a vizsgálatok komplexitása behatárolja a technika széles körű ipari elterjedését [124, 132]. Végül számolni kell a neutronaktiváció jelenségével is, mely során a vizsgált anyag a neutronsugárzás hatására radioaktívvá válhat, ami meghatározza, hogy a minta mennyi idő után kezelhető és szállítható biztonságosan [133, 134].

2.3 AM technológiák

2.3.1 AM technológiák csoportosítása

Az additív gyártás (Additive Manufacturing - AM), közismert nevén 3D nyomtatás, egy eljárás, amely során háromdimenziós modellek alapján, rétegről rétegre építve hoznak létre tárgyakat. A hagyományos, anyagleválasztáson alapuló (szubtraktív) eljárásokkal ellentétben, ahol egy nagyobb előgyártmányból munkálják ki a végterméket, az AM anyagtakarékosabb és magasfokú tervezési szabadságot biztosít komplex geometriák esetén is.

Az ISO/ASTM 52900:2021 [135] nemzetközi szabvány hét fő folyamatkategóriába sorolja az AM technológiákat. Az alábbiakban ezeket a kategóriákat ismertetem a szabványos elnevezésükkel és működési elvükkel.

A kötőanyag-sugaras (BJT) eljárás során folyékony kötőanyagot szelektíven juttatnak rétegenként a por alapanyagra. A nyomtatófej a digitális modellnek megfelelően mozog a porágy felett, és a kötőanyagot a kívánt helyekre "fecskendezi", összeragasztva a porszemcséket [135]. A folyamat során sokféle alapanyag felhasználható, beleértve fémeket, mint a rozsdamentes acél és a titán, valamint kerámiákat, polimereket és homokot is, utóbbit főként öntőformák készítéséhez. Ez a technológia gyors és viszonylag olcsó, azonban a késztermékek jellemzően porózusak, ezért utókezelést, például szinterezést vagy infiltrációt igényelnek a megfelelő mechanikai tulajdonságok eléréséhez.

Az irányított energiabevitelű leválasztásos (DED) technológia során fókuszált hőenergia, például lézersugár, elektronsugár vagy plazmaív segítségével olvasztják meg az alapanyagot, miközben az leválasztásra kerül. Az alapanyag jellemzően por vagy huzal formájában érkezik, és a

megolvasztott anyag egy hordozófelületre vagy egy már meglévő alkatrészre épül rá [135]. Főként fémötvözetek, így titán-, alumínium-, nikkel- és kobalt-króm ötvözetek feldolgozására használják. A technológia kiválóan alkalmas nagyméretű alkatrészek készítésére, valamint meglévő alkatrészek javítására vagy funkcionális bevonatokkal való ellátására.

Az anyagextrudálás (MEX) a legelterjedtebb és legismertebb 3D nyomtatási technológia, melynek legismertebb formája az FDM (Fused Deposition Modeling) [135]. A folyamat során egy termoplasztikus szál (filament) egy fűtött fúvókán keresztül nyomnak át, amely megolvasztja az anyagot. A nyomtatófej a digitális modell alapján előállított pályán mozog, és a megolvadt anyagot rétegről rétegre viszi fel, ami megszilárdulva létrehozza a tárgyat. Az eljáráshoz széleskörű polimerválaszték áll rendelkezésre, mint például a PLA, ABS, PETG, TPU, a nagy teljesítményű PEEK és különböző kompozitok. Megbízható, megfizethető és egyszerűen használható technológia, amely ideális prototípusok és funkcionális alkatrészek gyors és költséghatékony gyártására.

Az anyagsugaras (MJT) technológia a tintasugaras nyomtatáshoz hasonló elven működik [135]. A nyomtatófej fotopolimer gyanta apró cseppjeit juttatja szelektíven az építési platformra, majd egy UV fényforrás azonnal megkeményíti a lerakott réteget. Az eljárás alapanyagai a fényre keményedő fotopolimerek. Mivel rendkívül vékony rétegekkel dolgozik, kimagasló pontosságot és sima felületet eredményez. Különleges előnye, hogy képes rendkívül részletgazdag modellek létrehozására, és lehetőséget biztosít többféle anyag és szín egyidejű használatára egyetlen nyomtatáson belül.

A porágyas olvasztás (PBF) eljárások során hőenergia, melyet jellemzően lézer- vagy elektronsugár szolgáltat, szelektíven olvasztja össze poralakú alapanyag részecskéit [135]. Egy vékony porréteg kerül elterítésre munkatérben, majd a lézer a digitális modellnek megfelelően végigpásztázza a felületet. A felhasznált anyagok köre fémekre, mint az alumínium, titán és acél, valamint polimerekre, például nylonra terjed ki. Ezzel a módszerrel kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező, sűrű és tartós alkatrészek készíthetők, amelyeket gyakran használnak a repülőgépiparban, az orvostechikában és az autóiparban is.

A réteglaminálásos (SHL) technológia anyaglapok egymásra helyezésével és összekötésével hozza létre a tárgyat. Az egyes rétegeket a digitális modellnek megfelelő formára vágják, majd egymáshoz ragasztják [135]. Az alapanyag lehet papír, polimer, fém vagy akár kompozit is. Az SHL egy gyors és alacsony költségű eljárás, amely nem igényel támaszanyagot. Hátránya ugyanakkor

a viszonylag nagy anyagpazarlás, mivel a felesleges anyagot a nyomtatás után minden rétegből el kell távolítani.

A fotopolimerizációs (VPP) eljárás során egy folyékony, fényre keményedő gyantával teli kádban hozzák létre a tárgyat [135]. Egy fényforrás szelektíven világítja meg a gyanta felületét vagy alját, ami a megvilágított területen megszilárdítja a folyékony fotopolimer alapanyagot. Az építési platform minden réteg után elmozdul, lehetővé téve a következő réteg létrehozását. Ezzel a technológiával nagy pontosságú és kiváló felületi minőségű alkatrészek készíthetők, ezért széles körben alkalmazzák a fogászatban, ékszerkészítésben és a mérnöki prototípusgyártásban is.

2.3.2 Az additív gyártástechnológia minőség-ellenőrzése

Az additív gyártás (AM) alapjaiban formálta át az ipari termelést azáltal, hogy lehetővé tette korábban elképzelhetetlenül komplex geometriájú, funkcionálisan optimalizált és könnyű alkatrészek előállítását. Ez a rétegről rétegre építkező technológia azonban egyedi minőségbiztosítási kihívásokat is teremtett. A gyártási folyamat természetéből adódóan fennáll a belső, rejtett hibák – például porozitás, repedések vagy a rétegek közötti elégtelen összeolvadás – és a finom geometriai eltérések kockázata, melyek a hagyományos felületi ellenőrzési módszerekkel gyakran felderíthetetlenek [136, 137]. Különösen a nagy megbízhatóságot igénylő ágazatokban, mint a repülőgépipar, az orvostechnológia vagy az energetika, elengedhetetlen az alkatrészek integritásának garantálása, ami új, fejlett minőség-ellenőrzési stratégiákat követel meg [138, 139]. A hagyományos NDT módszerek korlátai az összetett AM alkatrészek esetében rávilágítottak az XCT jelentőségére, amely egyedülálló módon képes a teljes alkatrésztérfigat roncsolásmentes, 3D-s feltérképezésére [45, 140, 141].

A modern AM minőségbiztosítás egy kétszintű megközelítésen alapul, amely a hibák megelőzésére és azok utólagos, teljes körű azonosítására egyaránt törekszik.

Az első pillér a folyamat közbeni monitorozás, amelynek célja a hibák valós idejű észlelése és a folyamatparaméterekbe való azonnali beavatkozás. Ennek érdekében a gyártóberendezéseket fejlett szenzorokkal szerelik fel. Az optikai rendszerek, mint a nagy sebességű kamerák és lézerszkennerek, az ömledékmedence dinamikáját és a rétegek felületi minőségét figyelik [142, 143], míg a termikus szenzorok a hőmérsékleti eloszlást követik nyomon, amely kritikus információt hordoz a belső feszültségek és a potenciális hibák kialakulásáról [144]. Az akusztikus emissziós szenzorok pedig a repedések keletkezésére utaló hangjelenségeket detektálják [145, 146]. A legnagyobb áttörést a multiszenzoros adatok fúziója és a gépi tanulási algoritmusok alkalmazása jelenti, amelyek együttesen képesek a komplex mintázatok felismerésére és a folyamat zárt láncú,

adaptív szabályozására [147, 148]. Ezzel a minőség-ellenőrzés a reaktív hibajavításról a prediktív, megelőző szemlélet felé mozdul el, bár az ipari szintű bevezetést még hátráltatják az adatkezelési és szabványosítási hiányosságok [149, 150, 151].

A második, kiegészítő pillér az AM folyamat utáni ellenőrzés, amely a végleges alkatrész minőségének ellenőrzésére szolgál. Bár a hagyományos NDT módszerek, mint az ultrahangos vagy örvényáramú vizsgálatok [152, 153] továbbra is használatban vannak, komplex geometriák esetén gyakran nem nyújtanak teljes képet. Itt lép előtérbe az XCT, amely betekintést nyújt az alkatrészek belső szerkezetébe. Az XCT nem csupán a hibák felderítésére alkalmas, hanem a teljes belső és külső geometria precíz, háromdimenziós metrológiai felmérésére is [45, 97, 154]. Ezt a fizikai vizsgálatot egyre inkább kiegészítik a digitális ikrek és virtuális ellenőrzési módszerek, amelyek a szimuláció és a valós gyártási adatok ötvözésével teszik lehetővé a prediktív minőség-ellenőrzést [155, 156, 157].

Az XCT gyorsan az AM alkatrészek minőség-ellenőrzésének fontos szereplőjévé vált. A térfogati képalkotás lehetővé teszi azon belső hibák, mint a porozitás vagy repedések, pontos lokalizálását és méretének meghatározását, amelyek más módszerek számára láthatatlanok maradnának [158, 159, 160]. Emellett a dimenzionális metrológiai képességei elengedhetetlenek a bonyolult belső csatornákkal vagy rácsszerkezetekkel rendelkező alkatrészek méreteinek ellenőrzéséhez [161, 162].

A technológiai fejlődés ellenére a legnagyobb akadályt az AM-specifikus szabványok és referenciaanyagok hiánya jelenti [139, 163, 164]. A jelenlegi gyakorlatban gyakran a hagyományos gyártási eljárásokhoz kidolgozott szabványokat adaptálják, amelyek nem mindig veszik figyelembe az AM egyedi jellemzőit, például az anizotróp anyagtulajdonságokat vagy a jellegzetes hibatípusokat. Az egységes, megbízható és szabványos eljárások kidolgozása elengedhetetlen [165] a technológia széleskörű ipari elfogadásához [166, 167].

A jövő egyértelműen az integrált, intelligens és prediktív minőségbiztosítási rendszereké. A kutatások arra irányulnak, hogy a folyamat közbeni szenzoradatokat, a folyamat utáni XCT-vizsgálatokat és a digitális iker szimulációkat egyetlen, koherens keretrendszerbe foglalják [168, 169]. Ez lehetővé teszi nemcsak a hibák észlelését, hanem azok előrejelzését és megelőzését is. A hibrid munkafolyamatok, amelyek a fizikai méréseket kiterjesztett valósággal ötvözik, forradalmasíthatják az operátori döntéshozatalt és a hibajavítást [156].

2.3.3 Torzuláscsökkentési technikák az AM-ben

Az additív gyártási eljárások során, különösen a porágyas technológiáknál, a szelektív és gyors hőbevitelből származó hőmérsékleti gradiensek belső feszültségeket és ebből fakadó deformációt, torzulást okoznak. Ez a jelenség az egyik legfőbb akadálya a nagy méretpontosságú alkatrészek előállításának. A probléma kezelésére a szakirodalomban három fő stratégiai irányzat különíthető el: a prediktív modellezésen alapuló, a folyamatoptimalizáláson alapuló, valamint a mérésalapú korrekciós megközelítések.

Az első és legelterjedtebb stratégia a végeselemes modellezés (FEM) alkalmazása a torzulások előrejelzésére. Ennek lényege, hogy a gyártási folyamatot szimulálva előre megbecsülhetők a fellépő belső feszültségek és az ebből eredő deformációk. Ezen eljárások legnagyobb hátránya a rendkívül magas számítási kapacitásigény és a hosszú szimulációs idő. A számítási hatékonyság növelésére több módszer is létezik, például a háló sűrűségének csökkentése a kevésbé kritikus részen [170], vagy speciális, a számítási időt radikálisan lerövidítő módszerek alkalmazása [171]. A gyakorlatban a FEM-analízist két fő célra használják. Egyrészt a folyamatparaméterek, például a lézerpasztázási stratégia maradó feszültségekre gyakorolt hatásának elemzésére [172]. Másrészt a szimulációval kapott torzulási adatok alapján egy előkompenzált, az eredetihez képest szándékosan eltorzított CAD modell hozható létre, amely a gyártás során jobban megközelíti a névleges geometriát [173, 174]. E prediktív megközelítés ereje a megelőzésben rejlik, azonban pontossága nagymértékben függ a felhasznált anyagi és termomechanikai modellek precizitásától.

A második fő irányzat a gyártási folyamat szimuláción alapuló optimalizálása. Ez a megközelítés nem a geometriát módosítja, hanem magukat a gyártási paramétereket (pl. lézerpasztázás útvonala, lézer teljesítménye) igyekszik úgy szabályozni, hogy a hőmérsékleti gradiensek és az ebből fakadó feszültségek a lehető legkisebbek legyenek. Ide tartoznak azok a kutatások, amelyek neurális hálózatok segítségével keresnek optimális lézer-teljesítménymintázatot egy ideális hőkezelési folyamat eléréséhez [175], vagy olyan szerszámpálya-generáló algoritmusokat fejlesztenek, amelyek minimalizálják a hőmérsékleti gradienseket [176]. A különböző pásztázási stratégiák hatásának vizsgálata szintén ide sorolható, mivel a megfelelő stratégia kiválasztásával jelentősen csökkenthetők a maradó feszültségek [177]. Ez a preventív stratégia a probléma gyökerét célozza, de rendkívül komplex, fejlett szenzorokat és zárt láncú szabályozási rendszereket igényel.

A harmadik, és egyben a jelen disszertációban bemutatott kutatás alapját is képező módszer a mért torzulási adatok invertált alkalmazása. Ez a korrektív, adatvezérelt megközelítés a már

legyártott alkatrészen mért tényleges geometriai eltérésekből indul ki. A valós alkatrész és a névleges CAD modell közötti különbséget egy 3D mérés technikai eszközzel (pl. optikai szkennelvel vagy CT-vel) rögzítik [178]. A kapott torzulási adatokat invertálva alkalmazzák az eredeti CAD modellen. Az így létrehozott, kompenzált CAD modellt használják az újabb gyártáshoz, aminek eredményeképpen a kész alkatrész geometriája közelebb lesz az eredeti, névleges modellhez. Ez a módszer alkalmazható szimulált torzulási adatokkal is, ahol a FEM analízisből származó értékeket használják fel a kompenzációhoz, akár 50%-kal csökkentve a maximális torzulást [179].

3 Célkitűzések

Az ipari gyártástechnológiák, különösen az additív gyártás és a többkomponensű, különböző anyagokból felépülő szerkezetek térnyerése új kihívások elé állítja az ipari metrológiát és a minőségbiztosítást. A komplex belső geometriával rendelkező, illetve nehezen hozzáférhető felületek pontos és roncsolásmentes mérése kulcsfontosságúvá vált. A röntgentomográfia (XCT) erre a célra az egyik legalkalmasabb és legelterjedtebb eljárás, azonban alkalmazása során számos, még nem teljesen feltárt jelenség befolyásolja a mérési pontosságot és megbízhatóságot. A jelen kutatás célja, hogy ezekre a kihívásokra adjon tudományosan megalapozott válaszokat.

3.1 Szakirodalomban feltárt hiányosságok

A kutatás megkezdése előtt a releváns szakirodalom elemzése során a következő kulcsfontosságú hiányosságok voltak azonosíthatók:

1. Tomográfiás rendszerek objektív metrológiai összehasonlítása: az NCT dimenzionális metrológiai alkalmazása egy feltörekvő terület, azonban hiányzott egy olyan kalibrált etalon (kalibrációs fantom) és egy kapcsolódó módszertan, amely lehetővé tette volna a neutron- és a röntgentomográfiás rendszerek metrológiai teljesítményének objektív és megbízható összehasonlítását. A két képalkotó eljárás eltérő anyag-sugárzás kölcsönhatásai miatt a megfelelő anyagpárosítás és a neutronaktiváció utáni biztonságos kezelhetőség kérdése megoldatlan volt.
2. Többanyagú vizsgálati darabok mérések pontosságát befolyásoló tényezők: a többanyagú (pl. fém-polimer) összeállítások XCT-vel történő mérése során a különböző sűrűségű anyagok határfelületén fellépő felvételi műtermékek és a komponensek közötti légrések mérési pontosságra gyakorolt hatása nem volt szisztematikusan és kvantitatívan feltárva. A szakirodalomból hiányzott egy olyan átfogó vizsgálat, amely a szkennelési paraméterek, az anyagkombináció és a légrés méretének komplex, kölcsönös hatásait elemzi a dimenzionális mérési hibák alakulására.
3. Az additív gyártott alkatrészek pontosságának optimalizálása: bár az additív gyártástechnológiák, mint a szelektív lézeres szinterezés (SLS), torzulási és méretpontossági problémái jól ismertek, a szakirodalomban hiányzott egy olyan komplex, a röntgentomográfiás mérésekre épülő optimalizálási eljárás, amely együttesen kezeli a CAD modell geometriai kompenzációját és az alkatrészek munkatérben való tudatos pozicionálását a méretpontosság szisztematikus javítása érdekében. A meglévő

módszerek gyakran csak az egyik aspektusra fókuszáltak, és nem adtak átfogó megoldást a gyártóberendezés rendszerszintű kalibrációs hibáinak korrekciójára is.

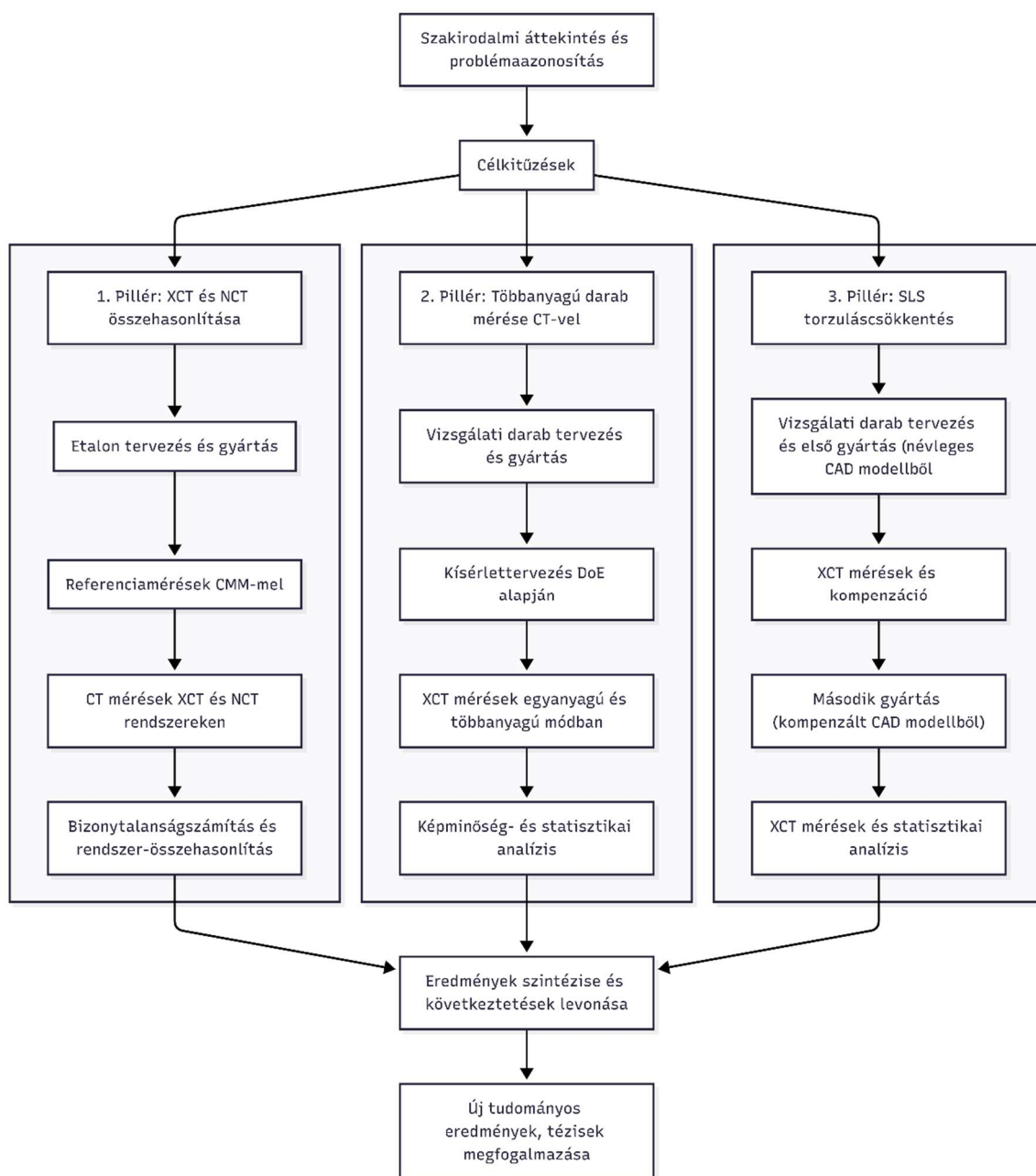
3.2 A kutatás célkitűzései

A fent vázolt szakirodalmi hiányosságokra alapozva, a kutatás során a következő fő célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1. Egy új, az XCT és NCT rendszerek objektív metrológiai összehasonlítására alkalmas kalibrációs fantom kidolgozása és validálása. Célom volt egy olyan etalon létrehozása, amely mindkét képalkotó eljárás számára megfelelő kontrasztot biztosít, miközben a neutronbesugárzás utáni alacsony aktivitása és rövid felezési ideje révén lehetővé teszi a biztonságos és ismételt felhasználást.
2. A tomográfiás mérési rendszerek összehasonlítására legalkalmasabb bizonytalanságszámítási módszer azonosítása, valamint a Energiatudományi Kutatóközpont (CER) NCT rendszerének kiterjesztett mérési bizonytalanságának meghatározása. Célként tűztem ki annak igazolását, hogy a neutron- és a metrológiai minőségű röntgentomográfia meghatározott mérési feladatok (pl. síkfelületek közötti távolságmérés) esetén metrológiailag összehasonlítható eredményeket szolgáltat.
3. Az XCT szkennelési paraméterek és a képminőségi mutatók közötti összefüggések szisztematikus vizsgálata egyanyagú és többanyagú (alumínium-polioximetilén) vizsgálati darabok mérésekor. Cél volt a voxelméret, a detektor-pixelegyesítés, az expozíciós idő és a forgatási mód hatásának feltárása a kontraszt-zaj viszonyra (CNR), a jel-zaj viszonyra (SNR) és a mérési pontosságra.
4. A légrések méretének és az anyagkombinációnak a mérési pontosságra gyakorolt komplex hatásának kvantitatív meghatározása többanyagú XCT mérések során. Céllal tűztem ki annak igazolását, hogy a többanyagú konfiguráció és a határfelületeken jelen lévő légrések szignifikánsan növelik a mérési hibát, különösen az alacsonyabb sűrűségű anyag esetében, valamint ipari metrológiai alkalmazásokhoz használható iránymutatás kidolgozását az optimális szkennelési paraméterek megválasztásához.
5. Céllal tűztem ki egy olyan módszer vizsgálatát és jellemzését, amely a röntgentomográfiás (XCT) méréseken alapuló CAD-modell kompenzációt és az alkatrész munkatérben való optimális orientációjának meghatározását ötvözi a geometriai eltérések és a gyártóberendezés rendszerszintű hibáinak minimalizálása érdekében.

3.3 Kutatási módszertan

A kutatás egy elméleti megalapozáson és egy hárompilléres kísérleti szakaszon alapult. A kísérletek során vizsgáltam az XCT és NCT rendszerek metrológiai teljesítményének összehasonlítását egy új kalibrációs fantommal; a szkennelési paraméterek és légrések pontosságra gyakorolt hatását többanyagú (fém-polimer) alkatrészeknél; valamint az SLS technológiával gyártott alkatrészek torzulásának csökkentését XCT mérésekre alapozott CAD-modell kompenzációval. A kutatási tervet a 3. ábra foglalja össze.



3. ábra: A vizsgálat folyamata

4 Röntgen- és neutrontomográfia összehasonlítása metrológiai szempontból

4.1 Kalibrációs fantom és vizsgálati darab tervezése

Egy kalibrációs fantomot és egy vizsgálati darabot terveztem. A kalibrációs fantom elsődleges szerepe, hogy a munkatérbe, a vizsgálati darab mellé helyezve a metrológiai visszavezetethez biztosítható a keletkező térfogati képen. A kalibrációs fantom másik szerepe a vizsgálataim során, hogy a CT rendszerek mérési bizonytalanságát annak segítségével határozom meg. A vizsgálati darab szerepe, hogy a geometriai felépítése lehetővé tegye olyan mérés-technikai jellemzők vizsgálatát, mint két síklap távolsága.

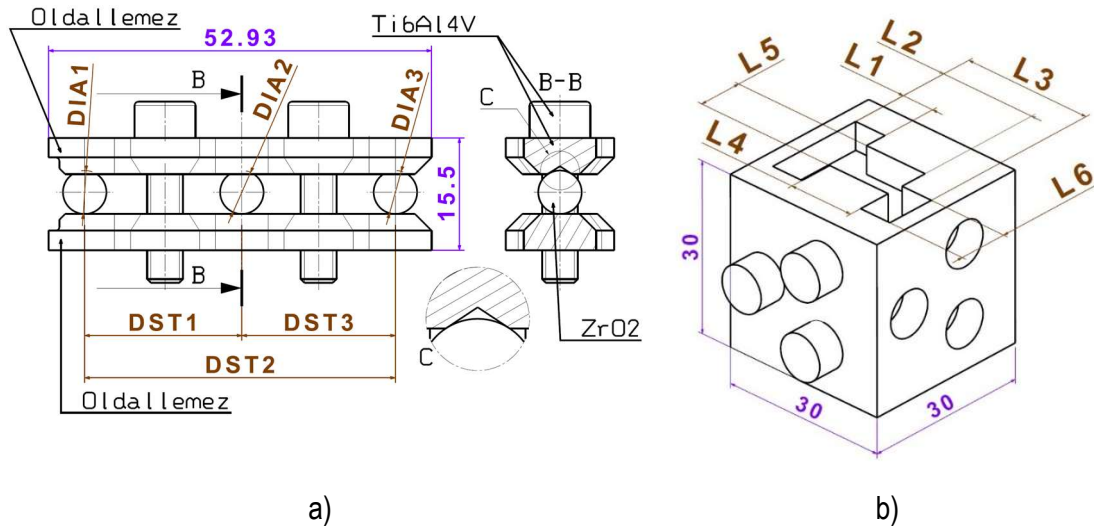
A CT berendezések mérési jellemzőinek vizsgálatához a leggyakrabban olyan etalont használnak, ami több gömböt tartalmaz. A gömbök használata a mérőgépek jellemzésénél azért annyira elterjedt, mert azok pontos gyártása könnyen kivitelezhető. A kalibrációs fantom tervezésénél több szempontot is figyelembe kellett vennem:

1. a kalibrációs fantomnak bele kellett férnie a választott CT berendezések közül a legkisebb munkatérbe is,
2. a kalibrációs fantomnak legalább három gömböt kell tartalmaznia,
3. a gömbök relatív pozícióját a kísérlet teljes ideje alatt biztosítani kell elfogadható határokon belül.

A VDI/VDE 2617 Blatt 1.3 [180] irányelv a CT berendezések metrológiai vizsgálatához gömböket javasol. A vizsgálatokhoz használt etalonnak (jelen esetben kalibrációs fantomnak) legalább három gömböt kell tartalmaznia. A gömböket egyenes vonalban helyeztem el az etalonban, ezzel csökkentve az áthatolási keresztmetszetet, lehetővé téve kis teljesítményű röntgencsővel szerelt XCT berendezés használatát a vizsgálat során. A [180] azt is előírja, hogy a vizsgálati etalonnak olyannak kell lennie, aminek az áthatolási keresztmetszete nem nagyobb a vizsgált berendezés maximális áthatolási képességénél. Az etalon tervezésénél a középső gömböt 0,5 mm névleges értékkel eltoltam a szimmetriasíktól, hogy több hosszúságértéket tudjak vizsgálni, összhangban a [180] ajánlásával.

A gömbök rögzítésének tervezésekor a gömbök ragasztását és keményforrasztását is megvizsgáltam. A ragasztók nagy hidrogéntartalmuk miatt nem alkalmasak a neutrontomográfias képfelvételekhez. A keményforrasztásnál olyan anyagok vannak a forrasztóanyagban, amik hosszú

felezési idejű és nagy aktivitású izotópokat eredményeznek neutronsugárzás hatására. Az említett okok miatt csak a mechanikus rögzítés jöhetett szóba, és olyan anyagok alkalmazása mind a gömbök esetében, mind a tartószerkezetnél, amelyekben a neutronsugárzás hatására nem keletkeznek nagy aktivitású és hosszú felezési idejű izotópok. A gömbök rögzítését két oldallemez csavarokkal történő összeszorításával értem el. Az egyik oldallemez belső, a gömbökkel érintkező felülete sima, a másik oldallemez felületébe kúp alakú fészket alakítottam ki. Az összeállított kalibrációs fantom az 4/a ábrán látható.



4. ábra A kalibrációs fantom műszaki rajza a), a vizsgálati darab izometrikus ábrája b)

A vizsgálati darab geometriáját úgy kellett kialakítanom, hogy könnyen felvehető legyen rajta a bázisrendszer, emiatt három merőleges síkot terveztem a darabra. A síkok metszéspontja felhasználható a koordinátarendszer nullpontjának. A síkfelületeken kialakítottam furatokat és csapokat, valamint egy alakos zsebet, aminek az egymással párhuzamos oldalai között távolságok mérhetők. A vizsgálati darab az 4/b ábrán látható. A vizsgálati darabnak a hátsó részét egy három csúcsot érintő síkkal lelapoltam anyagtakarékossági szempontból.

4.2 Kalibrációs fantom és vizsgálati darab anyagválasztása

A kalibrációs fantom és a vizsgálati darab anyagválasztásánál figyelembe kellett vennem azt, hogy az anyagokon a tervezett méretben át kell hatolnia a röntgen és neutronsugárzásnak megfelelő mértékű elnyelődés mellett.

A neutronsugárzás hatására keletkező izotópok felezési ideje és aktivitása nem lehet nagy az etalon és a vizsgálati darab esetében. Az aktivitási értékekre az egyes izotópokra hatósági határértékek vannak meghatározva, amelyeket túllépve, a besugárzott darab nem adható ki. Az vizsgálati darab és a kalibrációs fantom újrahazsnálhatósága miatt ez egy fontos szempont.

Vontobel és társai cikkében [181] megtalálhatók egyes anyagok elnyelési együtthatói röntgen- és neutronsugárzáshoz.

A metrológiai vizsgálatoknál és a tapintós mérőgépeknél alumínium-oxid (Al_2O_3) gömböket használnak. Az Al_2O_3 elnyelési együtthatója annyira kicsi a neutronsugárzás esetében, hogy az az NCT felvételeken nem ad megfelelő kontrasztot. Az XCT rendszerek metrológiai vizsgálatánál a leggyakrabban használt gömbök anyaga Al_2O_3 [182, 183].

A műszaki alkalmazásokban alkalmazott gömbök minőségét [184] írja le. Az XCT és NCT rendszer felbontása és várható pontossága miatt a [184] szerinti G10-es minőségű gömbök megfelelőek a vizsgálat elvégzéséhez. A G10-es minőségnél a gömbalakúság legfeljebb $0,25\text{ }\mu\text{m}$ lehet. G10-es minőségű gömbök alkalmazását láthatjuk [185]-ben XCT rendszer vizsgálatánál. A fémkarbid gömbök alkalmazása is gyakori a mérés technikában, de például a volfrám-karbidon nehezen hatol át a röntgensugárzás. A röntgensugárzás áthatolóképessége miatt az oxidkerámiákból készült gömbök között kerestem megfelelőt az vizsgálataimhoz.

Csapágygolyókat gyártanak cirkónium-dioxidból (ZrO_2), melynek a tulajdonságai megfelelőek XCT és NCT szempontból. A ZrO_2 alapú gömböket kétféle összetételben találtam meg a kiskereskedelemben:

- a) 95 wt. % ZrO_2 és 5 wt. % Y_2O_3
- b) 96 wt. % ZrO_2 és 4 wt. % MgO

ahol a wt. % a tömegszázalékot jelenti. Ez a kétféle anyagösszetétel nem tartalmaz olyan anyagokat, amelyek neutronsugárzás hatására hosszú felezési idejű vagy nagy aktivitású izotópokat eredményeznének. Az elérhetőség miatt az Y_2O_3 tartalmú gömböket választottam.

A három gömb együttes tömege 2,1 gramm. A keletkező izotópokat ingyenesen használható kalkulátorral [186] ellenőriztem. A kalkulációhoz meg kellett határoznom a vegyületek elemi összetételét:

- a) Zr – 70,33 wt %
- b) Y – 3,94 wt. %
- c) O – 25,73 wt. %

A gömbök szimulációs eredményei az 1. mellékletben láthatók. A neutronsugárzás hatására keletkező izotópok közül a ^{88}Y -nak van a leghosszabb felezési ideje, ami 106,61 nap, a második leghosszabb felezési ideje a ^{90}Y -nak van, ami 64 óra. A táblázatban látható határérték oszlopban

láthatók azok az aktivitási határértékek Becquerel mértékegységben, amik alatt a besugárzott tárgyak kiadhatók. A további oszlopokban azok az aktivitási eredmények láthatók, amik a besugárzást követő nulladik percben, 1 órával, 24 órával és 14 nappal később mérhetők. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a gömbökben az NCT felvétel készítése közben nem keletkeznek olyan izotópok, amelyek aktivitása a határérték felett lenne.

1. táblázat: az Ti6Al4V ötvözet összetétele tömegszázalékban (wt %)

Al	V	Fe	O	N	C	H	Ti
5,5-6,75	3,5-4,5	max 0,3	max 0,2	max 0,05	max 0,08	max 0,01	maradék

A kalibrációs etalon gömböket rögzítő szerkezetéhez és a vizsgálati darabhoz is olyan anyagot kellett választanom, ami az NCT felvételkészítés után kiadható, vagyis nem keletkezik benne határértéket átlépő aktivitás és megfelelő az NCT és XCT képalkotáshoz. A műanyagok a nagy hidrogéntartalmuk miatt nem jöhetnek szóba az NCT szempontjából. A neutronsugárzás elnyelődése nagyon nagy mértékű a hidrogénben, ebből az okból kifolyólag fémötvözeteket kezdtem el vizsgálni. Porágyas AM technológiával lehetőség van többek között 316L és 17-4PH acélötvözetek nyomtatására. Az acélokban neutronsugárzás hatására ^{60}Co izotóp keletkezik, aminek a felezési ideje 5,27 év és magas az aktivitása. Ezt az izotópot roncsolásmentes anyagvizsgálatban is használják például vastag falú csövek hegesztett varratainak ellenőrzésére. Az acélok másik hátránya, hogy a röntgensugárzás elnyelődése magas bennük. Emiatt az alumínium és titánötvözeteket vizsgáltam meg. Az alumíniumot elvettem az alacsony keménysége és merevsége miatt és a leggyakrabban használt Ti6Al4V ötvözetre végeztem el az aktiválódási szimulációt. A Ti6Al4V ötvözet összetétele az 1. táblázatban látható [187] szerint.



5. ábra: Az elkészült kalibrációs fantom (a) és vizsgálati darab (b)

A Ti6Al4V ötvözetből a kalibrációs fantom két oldallemeze, a két csavar és a vizsgálati darab áll, amiknek a tömege összesen 118 gramm. Az összetételt úgy adtam meg a kalkulációnál, hogy a 1. táblázatban látható alsó és felső értékek átlagát használtam fel az Al és V elemekre, azoknál az elemeknél, amelyeknél csak felső határ van megadva, ott a felső határértéket használtam. Az így kapott bementi paraméterekkel elvégeztem az aktivitási kalkulációt, melynek eredménye a 2. mellékletben látható. A neutronsugárzás hatására a Ti6Al4V ötvözetben keletkező radioaktív izotópok közül a leghosszabb felezési ideje az ^{55}Fe -nek van, ami 2,7 év. Az ^{55}Fe aktivitása rendkívül kicsi, 10,95 Bq a besugárzást követően. A legnagyobb aktivitást az ^{52}V izotóp okozza, ami $8,22\text{E}+06$ Bq, mindössze 3,75 perces felezési idővel. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a Ti6Al4V ötvözetben a CER-ben használt neutronforrás 10 órás besugárzásával nem keletkeznek olyan radioaktív izotópok, amik aktivitása határértéken felüli, pár órás pihentetés után. A legyártott kalibrációs fantom és a vizsgálati darab a 5. ábrán látható.

4.3 Mérések

4.3.1 Referenciamérések

A CT vizsgálatok megkezdése előtt meg kellett határoznom a kalibrálási fantom és a vizsgálati darab referenciaértékeit. A méréseket egy Zeiss Prismo tapintós koordináta-mérőgépen (CMM) végeztem. A referenciaméréseket a vizsgálathoz használt mérési eszköznél pontosabb mérőeszközzel kell elvégezni, hogy a referenciaértékek mérési bizonytalansága a vizsgált mérőeszköz mérési bizonytalanságát kevésbé befolyásolja. A maximálisan megengedett eltérési határ (MPE) hosszméretek esetében az MPE_{E0} [188], ami a következő egyenlettel fejezhető ki [188, 189] szerint:

$$\text{MPE}_{\text{CMM}} = 0,9 + \left(\frac{L_{\text{mm}}}{350} \right) \mu\text{m} \quad (5)$$

Ahol L_{mm} a mért hossz milliméterben és az eredmény μm -ben értendő. A vizsgálathoz használt Zeiss Prismo mérőgép a kalibrálási jegyzőkönyve alapján (5) a határértéknek megfelel. Ezért az MPE_{CMM} értéket fogom figyelembe venni a CT berendezések mérési bizonytalanságának számításánál.

A referenciaméréseket ötször ismételttem meg és ezeknek az átlagát használtam, mint referenciaérték. A kalibrációs fantom gömbjeinek az átmérőjét (DIA1-3) és a gömbök középpontjainak távolságát (DST1, DST2 és DST3) mértem meg (4/a ábra). A mérésnél egy 1 mm átmérőjű rubingömb-tapintót használtam. A tapintóval szkennelési üzemmódban egy oldalról négy

ív mentén vettem fel mérési pontokat. A tapintóval csak az egyik oldalról végeztem el a pontok mérését, így elég volt egy tapintót használni. A kalibrációs fantom referenciaértékei a 2. táblázatban láthatók.

A vizsgálati darabon a síkokkal határolt zseb oldalai között mértem meg hat sík-sík távolságot (L1-6), amiket a 4/b ábra ábrázol. A síklapok távolságainak referenciaértékeit ugyanazzal a CMM géppel mértem meg, mint a kalibrációs fantomot. A mérés során 1 mm átmérőjű gömbtapintót használtam. A síkok mérésénél zig-zag stratégiát választottam szkenneléshez.

A kalibrációs fantom gömbjein mért pontokra a legkisebb négyzetes eltérések módszerével (Gauss) illeszttem gömböket, majd ezeknek az illesztett gömböknek a középpontjait használtam fel a távolságok (DST1-3) meghatározásához. A DIA1-3 átmérőértékek a Gauss módszerrel illesztett gömbök átmérőértékei.

2. táblázat: A kalibrációs fantom referenciaértékei

Jellemző	Referenciaérték [mm]	Szórás [mm]
DIA1	5,99480	0,00008
DIA2	5,99964	0,00009
DIA3	5,99966	0,00009
DST1	21,71478	0,00011
DST2	43,00272	0,00008
DST3	21,28794	0,00005

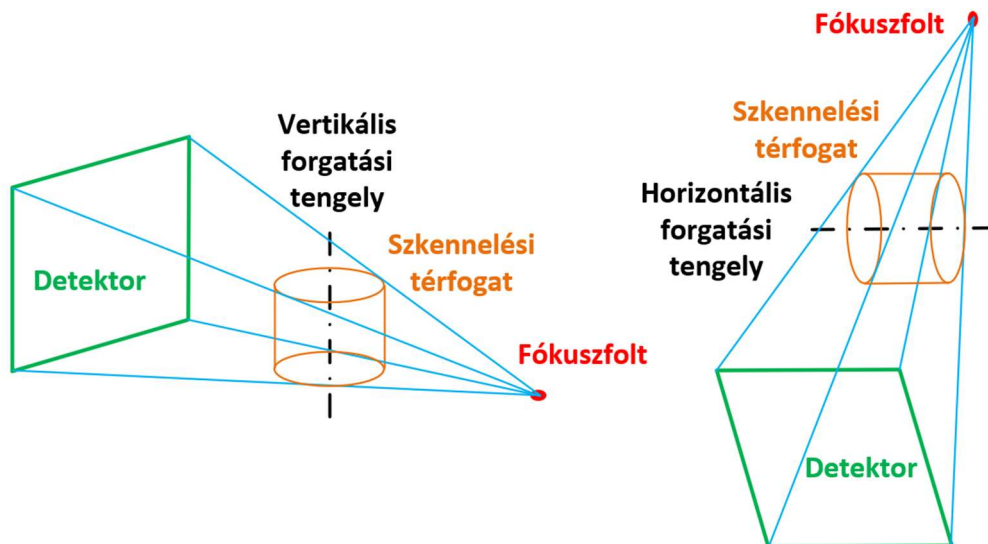
A vizsgálati darab mérését bázisrendszerben végeztem. A bázisrendszer nullpontját három síkfelület metszéspontjában vettem fel. Az elsődleges bázisként a hengeres furatokat tartalmazó síkot, a másodlagosként a hornyot tartalmazó síkot és harmadlagosként a hengeres csapokat tartalmazó síkot állítottam be. A síklapokra Gauss módszerrel téglalapokat illesztettem és meghatároztam a súlypontjukat. A súlypontok távolságát a bázisrendszerben kiértékeltem és ez adta a mérési eredményeket (L1-6). A referenciaértékek az ötször ismételt eredmények átlaga.

A különböző CT rendszerekkel történő mérések között és az összes mérés után is végeztem ellenőrzőméréseket a Zeiss Prismo CMM géppel, hogy a kalibrációs fantom stabilitását ellenőrizsem. A CT mérések között és azok után történt mérési eredmények között nem tapasztaltam szignifikáns eltérést, ezért a referenciaértékek valószínűleg tekinthetők mindegyik CT rendszerrel történő mérésnél.

4.3.2 Röntgentomográfiás mérések

Összesen három XCT rendszert használtam a vizsgálatok során, melyek: GE Micromex (XCT1), Waygate Technologies Vtomex M (XCT2) és Werth Tomoscope XS (XCT3). A rendszerek kiválasztásánál az volt a szempont, hogy többféle minőségi és árfekvésű osztályból legyenek XCT rendszerek, hogy a vizsgálat végén ki lehessen választani egy XCT rendszert, aminek a mérési tulajdonságai a legjobban hasonlítanak az NCT mérési tulajdonságaihoz. Az XCT1 rendszer a legolcsóbb, az ára 200.000 és 300.000 EUR, míg az XCT2 rendszer 800.000 és 1.000.000 EUR közé tehető. Az XCT3 rendszer ára az előbbi kettő közé tehető: 350.000-től 500.000 EUR-ig.

Az XCT1 rendszer kis méretű 200 x 200 mm-es digitális detektorral rendelkezik. Felépítését tekintve a röntgenső és a detektor függőleges elrendezésű (6. ábra). Ennél a felépítésnél a vizsgálati tárgyat forgató tengely horizontálisan helyezkedik el, ami nem előnyös. A horizontális forgatótengely hátránya, hogy a tengely a darabbal együtt lehajlik a gravitáció hatására, ez rontja a rendszer képfelvételi képességét. Emiatt a rendszer nem alkalmas nagy precizitású mérések elvégzésére. Az XCT2 és XCT3 rendszerek dimenzionális mérésekre felkészített rendszerek, melyeknek a felépítése, merevsége lehetővé teszi a precíz méréseket. Az XCT2 és XCT3 rendszerekben a röntgenső és a detektor horizontális, a forgatóasztal tengelye pedig vertikális helyzetű (6. ábra).



6. ábra: Bal oldalon a vertikális, jobb oldalon a horizontális forgatótengelyes elrendezésű XCT felépítés

Az XCT2 rendszert havonta kalibrálják egy olyan etalonnal, ami egy karbonszálas lemezből és gömbökből áll. Ezzel az etalonnal a detektor pixelméretét és a nagyítást lehet kalibrálni, ami

szükséges ahhoz, hogy a rekonstruált térfogati kép voxelmérete pontos legyen. Az XCT2 rendszer alaktapogatási hibáját (MPE_{PF}) [190] a következő egyenlettel lehet leírni [191] szerint:

$$MPE_{XCT2} = 5,5 + \left(\frac{L_{mm}}{100}\right) \mu m \quad (6)$$

Az XCT3 kalibrálása évente történik több gömbből álló etalonokkal a gyártó által és az alaktapogatási hibája (MPE_{PF}) [190] szerint a következő egyenlettel írható le:

$$MPE_{XCT} = 4,5 + \left(\frac{L_{mm}}{75}\right) \mu m \quad (7)$$

Az XCT rendszerek szkennelési paraméterei az 3. táblázatban láthatók. A röntgencső gyorsítófeszültsége meghatározza a röntgensugárzás áthatolóképességét, a csőáram pedig az egységnyi keresztmetszeten áthaladó röntgenfotonok számát. A fizikai szűrő a röntgencső kilépőablaka előtt helyezkedik el és a röntgennyaláb spektrumát befolyásolja. A projekciós képek száma megadja az egy teljes körbeforgatás során a pozíciók számát, amiben a vizsgálati darabról kép készül. Az átlagolt képek száma az egy pozícióban készült képek számát jelenti. Ha egy pozícióban több kép készül, akkor azokat a szoftver átlagolja, ami csökkenti a képen a zajt. A nagyítást az határozza meg, hogy a forgatóasztal tengelye hol helyezkedik el a röntgencső és a detektor között. A fókuszfolt és a detektor távolsága az FDD és a fókuszfolt és a forgatóasztal tengelyének távolsága pedig az FOD.

3. táblázat: Az XCT rendszerek szkennelési paraméterei, ahol FDD a fókuszfolt és a detektor távolsága, FOD pedig a fókuszfolt és a forgatóasztal tengelyének a távolsága

XCT rendszerek	XCT1 Micromex	XCT2 Vtomex M	XCT3 Tomoscope XS
Gyorsítófeszültség [kV]	180	170	160
Csőáram [μA]	50	290	500
Fizikai szűrő	1 mm Sn	0,5 mm Cu	1 mm Sn
Voxelméret [μm]	63,68	40	34,69
Projekciók száma	1440	1800	2400
Expozíciós idő [ms]	200	500	1500
Átlagolt képek száma	30	2	3
Nagyítás	3,141	5	1,41
FDD [mm]	641,37	807,24	500,84
FOD [mm]	204,2	161,45	354,29

4.3.3 Neutrontomgráfias mérések

Az NCT felvételkedés az Energiatudományi Kutatóközpont (CER) reaktorának kettes számú vízszintes csatornájának RAD vizsgálati állomásán történt. A neutronsugárzás és a vizsgálati

darab közé egy 150 mm hosszú zafírszűrő volt behelyezve, hogy a nagy energiájú (epitermális és gyors) neutronok ki legyenek szűrve. A szűrt neutronnyaláb termikus ekvivalens fluxusa 3×10^7 n/cm²s volt és elhanyagolható mértékben tartalmazott nagyobb energiájú neutronokat. A kollimációs arány (L/D) 233, ami közel párhuzamos sugarakból álló nyalábot jelent. A kalibrációs fantomot alumínium fólia támasztotta a felvét elkészítés során. A 180 fokos forgatás közben 601 projekciós kép készült 100 μ m vastag ⁶LiF/ZnS szcintillációs ernyővel, 60 másodperces expozíciós idővel képenként. A projekciós képeket nagy felületű sCMOS kamera (Andor Neo5.5) rögzítette 105 mm-es rögzített fókusztávolságú objektívvel. A felvét elkészítés 10 órát vett igénybe és a rendszer látómezeje 100 x 100 mm² volt. Az elért voxelméret 42,72 μ m volt. A képfeldolgozás során a legújabb Fiji-ImageJ, Octopus 8.9, VGStudio 3.2 és KipTool szoftvereket használtam.

A dimenzionális méréseket a VGStudio Max 3.5.1 szoftverben végeztem az XCT1, XCT2, XCT3 és az NCT esetében. A megírt mérőprogramot automatikusan futtattam a CT felvételeken. A Ti6Al4V és a ZrO₂ gömbök szegmentációját és felületmeghatározását az XCT1, XCT2 és az NCT esetében a VGStudio 3.5.1 szoftverben csináltam. XCT3 esetében a Winwerth 9.45 szoftvert alkalmaztam a szegmentációhoz és a felületi pontfelhő (STL) exportálására.

4.4 A kidolgozott mérési modell

A mérési bizonytalanság meghatározásához fel kell írni a mérési modellt. Az XCT és NCT rendszerek mérési modellje [192, 193, 194, 195] alapján:

$$l_x = l_{disp} + \delta l_{cal} + \delta l_{rep} + \delta l_{sample} + \delta l_T + \delta l_{bias} \quad (8)$$

ahol: l_x az ismeretlen hossz értéke (Y), l_{disp} a kijelzett érték (X1), δl_{cal} a referenciamérésekhez használt mérőeszköz kalibrációjából származó korrekciós tag (X2), δl_{rep} az ismétlésből származó korrekciós tag (X3), δl_{sample} a vizsgálati darab inhomogenitásából származó korrekciós tag (X4), δl_T a hőmérsékleti korrekciós tag (X5) és δl_{bias} az mérőeszköz torzítása (X6).

A (8) egyenlet jobb oldalán a bemeneti mennyiségek (X_i) és bal oldalon a kimeneti mennyiség (Y) található. Minden egyes x_i bemeneti becslött érték és a hozzá tartozó $u(x_i)$ standard bizonytalanság az X_i bemeneti mennyiség lehetséges értékeinek eloszlásából származik [196]. A bemeneti paraméterek között nincs korreláció, ezért az ismeretlen méretek hosszának összegzett standard bizonytalansága a GUM [196] szabályai alapján a következő:

$$u_c(l_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial l_x}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (9)$$

A bemeneti becsült értékek (x_i) és a hozzájuk tartozó standard bizonytalanságok a következő módon számíthatók ki:

- Az l_{disp} a mért jellemzők kijelzett értéke. Mivel az NCT mérések rendkívül korlátozott hozzáférhetősége és a magas költségei miatt a mérések időbeli ismétlésére nem volt lehetőség, így $u(l_{disp}) = 0$. Az ismételhetőség hatását a δl_{rep} tagban vettem figyelembe (lásd c. pont).
- A δl_{cal} várható értéke nulla. Az $u(\delta l_{cal})$ a referenciaméréseket végző mérőgép standard bizonytalansága. Az $u(\delta l_{cal})$ a Zeiss Prismo mérőgép legnagyobb megengedett hibájából (MPE_{CMM} , (4) egyenlet) számítottam ki. Ha az MPE meg van határozva és egyenletes eloszlás feltételezése mellett $u(\delta l_{cal})$ a következőképpen számítható ki:

$$u(\delta l_{cal}) = \frac{MPE_{CMM}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

- A δl_{rep} várható értéke nulla. Ez a tag reprezentálja a mérőrendszer ismétlőképességéből származó bizonytalanságot. Az NCT korlátozott hozzáférhetősége és magas költségei miatt ismételt szkennelésre nem volt lehetőség, így egy alternatív, térbeli ismétlésen alapuló statisztikai megközelítést alkalmaztam. A kalibrációs fantomot kifejezetten úgy terveztem, hogy azon három különböző, metrológiailag független gömbközéppont-távolság legyen mérhető. Ahhoz, hogy kiszámolhassam az $u(\delta l_{rep})$ tagot, szükséges a relatív mérési hiba (RME), amely a következőképpen számolható ki:

$$RME_j = \frac{y_{i,j} - y_{ref,j}}{y_{ref,j}} \cdot 100 \quad (11)$$

Ahol $y_{i,j}$ az i -edik mérőeszköz által mért j -edik jellemző értékét jelöli, míg $y_{ref,j}$ a j -edik jellemző referenciaértékét képviseli. Az eredmény százalékos formában van megadva. Az $u(\delta l_{rep})$ tag az ismétlőképességet jelenti. Az ismétlőképességet a gömbközéppontok közötti három különböző távolságból számoltam ki, mivel a méréseknél nem volt ismétlés. Az $u(\delta l_{rep})$ a következő egyenlettel számoltam ki:

$$u(\delta l_{rep})_j = \frac{s_{RME} \cdot y_{ref,j}}{100} \quad (12)$$

Ahol s_{RME} a három gömbközéppont-távolságokból számított relatív mérési hibák szórása. A $u(\delta l_{rep})_j$ tag milliméterben kifejezve a j -edik jellemzőből adódó standard bizonytalansági összetevőt jelenti. Mivel a különböző távolságok mérésekor fellépő egyedi szisztematikus hatások is növelik a számított szórást (s_{RME}), az $u(\delta l_{rep})$ tag valószínűleg felülbecsüli a felvételek ismételéséből származó bizonytalanságot.

- d. A δl_{sample} várható értéke nulla. Mivel a vizsgálatot egy kalibrációs fantomon végeztem el, a gyártási eltérésekből adódó felületi inhomogenitás elhanyagolható, ezért ennek a bemeneti változónak a standard bizonytalansága, $u(\delta l_{sample}) = 0$.
- e. A δl_T várható értéke nulla. Az (8) egyenlet $u(\delta l_T)$ tagjának meghatározásához a Δl -t a következő egyenlettel számítottam ki:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_{ref} \quad (13)$$

Ahol az α a lineáris hőtágulási együtthatót (CLTE) jelöli. A Ti6Al4V ötvözet CLTE-je $8 \times 10^{-6} K^{-1}$, míg a ZrO₂ gömbök CLTE-je $10 \times 10^{-6} K^{-1}$. A ΔT a CT berendezés hőmérséklete és 20 °C közötti különbséget jelöli. Az l_{ref} a méret referenciaértéke. A mért értékek egyenletes eloszlását feltételezve az $u(\delta l_T)$ a következőképpen határozható meg:

$$u(\delta l_T) = \frac{\Delta l}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

- f. A δl_{bias} értékét különféle módokon lehet figyelembe venni. Jelenleg nincs egyetértés arról, hogy ezt a bemeneti paramétert hogyan kell beépíteni a mérések bizonytalansági számításába. A torzítás figyelembevételét egy későbbi fejezetben részletesen leírom.

A (8) egyenlet szerinti mérési modell alapján az eredő standard bizonytalanság, (8) egyenlet a következőképpen néz ki:

$$u_c(l_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^6 u^2(x_i)} = \sqrt{u^2(l_{disp}) + u^2(\delta l_{cal}) + u^2(\delta l_{rep}) + u^2(\delta l_{sample}) + u^2(\delta l_T) + u^2(\delta l_{bias})} \quad (15)$$

A (15) egyenletben több standard bizonytalansági tagot elhagytam a fentiekben részletezett okok miatt és a torzítást sem vettem figyelembe az első megközelítésnél, ezért (15) a következőképpen egyszerűsödött:

$$u_c(l_x) = \sqrt{u^2(\delta l_{cal}) + u^2(\delta l_{rep}) + u^2(\delta l_T)} \quad (16)$$

A kiterjesztett mérési bizonytalanságot $k=2$ [196] esetében körülbelül 95%-os megbízhatósági szinttel és a torzítás nélkül a következő egyenlettel lehet kifejezni:

$$U_0 = k \cdot u_c(l_x) = 2 \cdot u_c(l_x) \quad (17)$$

Ahol a kiterjesztett mérési bizonytalanságot a torzítás figyelembevétele nélkül U_0 -nak neveztem el.

A mérési hiba két komponensre bontható [197] szerint, egy szisztematikus hibára, ami állandó értéket vesz fel vagy előreláthatóan változik ismételt méréseknél és egy véletlenszerű hibára, amit nem lehet előre jelezni. Az állandó hibát torzításnak nevezzük és a következőképpen számítható ki:

$$\delta l_{bias} = X_{measured} - X_{ref} \quad (18)$$

Ahol $X_{measured}$ a mért értékek átlaga és X_{ref} a referenciaérték. A referenciaértéket jelen esetben a Zeiss Prismo CMM-el határoztam meg.

A torzítás hatása számos módszerrel beépíthető a kiterjesztett mérési bizonytalanságba [198, 199, 200]. Ebben a kutatásban négy különböző módszert alkalmaztam a torzítás hatásának a kiterjesztett mérési bizonytalanság-számításába történő beépítésére.

Az $RSSu_c$ (négyzetes összegzés, RSS) módszer a korrigálatlan δl_{bias} tagot további bizonytalansági tényezőként kezeli és RSS módszerrel adja hozzá az u_c standard bizonytalansághoz:

$$U_{RSSu_c} = k \sqrt{u_c^2 + \delta l_{bias}^2} \quad (19)$$

Ez a módszer elégséges bizonytalansági lefedettséget biztosít (gyakran 95% felett), azonban, ha $|\delta l_{bias}| \leq ku_c$, alacsony becslést ad nagy torzítások esetén [198, 201].

Az $RSSU$ módszer a torzítást közvetlenül a kiterjesztett mérési bizonytalansággal összegzi RSS módszerrel:

$$U_{RSSU} = \sqrt{k^2 u_c^2 + \delta l_{bias}^2} \quad (20)$$

Miközben ez a módszer növeli a kiterjesztett mérési bizonytalanságot, de ha $|\delta l_{bias}|/(ku_c) > 1$, akkor elégtelen fedést biztosít [198, 201].

A $SUMU_{max}$ módszer [202] közvetlenül hozzáadja a torzítás abszolút értékét a kiterjesztett mérési bizonytalansághoz:

$$U_{SUMU_{max}} = ku_c + |\delta l_{bias}| \quad (21)$$

Ez a módszer túlbecsüli a kiterjesztett mérési bizonytalanságot, ha $|\delta l_{bias}|/(ku_c) \leq 1$, de megfelelő lefedettséget biztosít nagy torzítás esetén [198, 201].

Az utolsó módszer, amit torzítás figyelembevételére használtam a VDA 5 ajánlásban [203] található. A VDA 5 ajánlás a torzítást standard bizonytalansági tényezőként veszi figyelembe. Folytonos eloszlást feltételezve a torzításra, a standard bizonytalanságát a következőképpen számíthatjuk ki:

$$u_{bias} = \frac{\delta l_{bias}}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

A kiterjesztett mérési bizonytalanság a VDA 5 ajánlás szerint:

$$U_{VD} = k \sqrt{u_c^2 + u_{bias}^2} \quad (23)$$

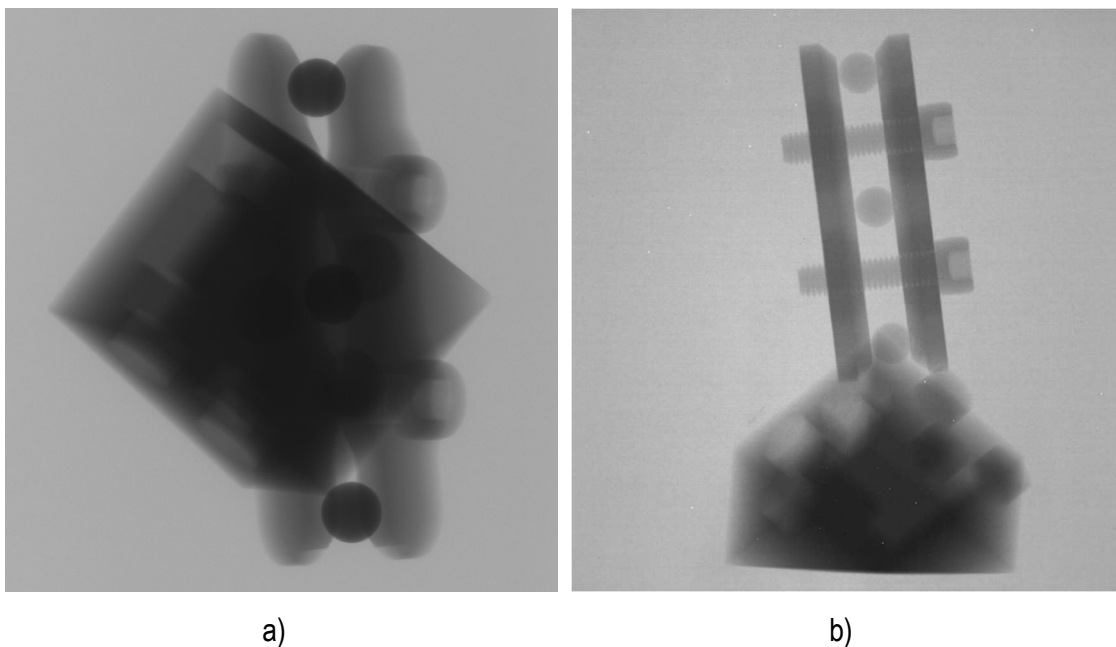
4.5 Eredmények

4.5.1 A röntgen- és neutrontomográfia összehasonlítása képalkotási szempontból

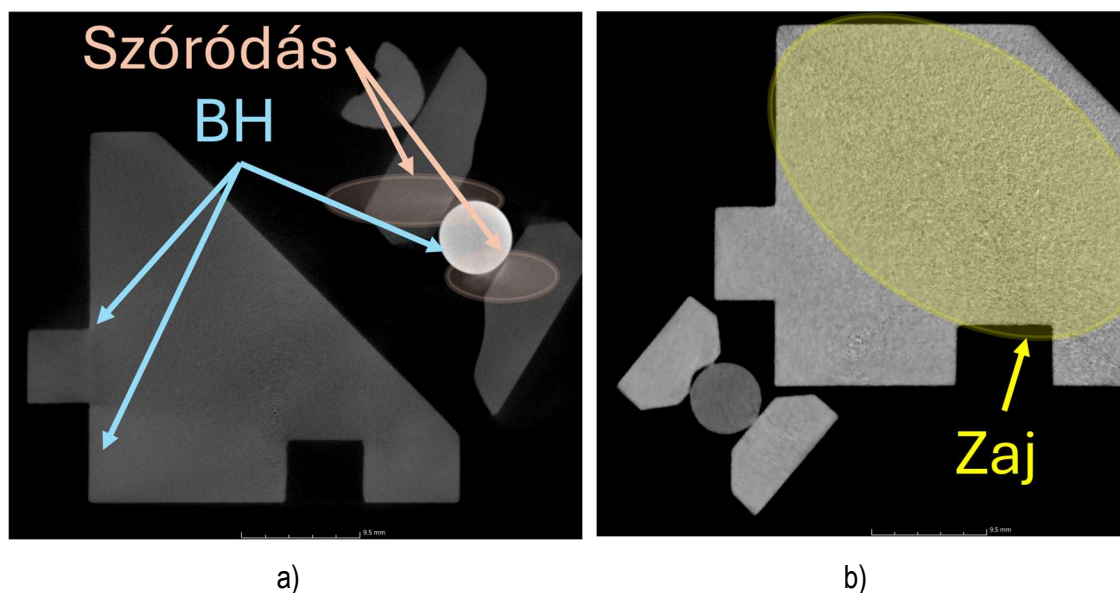
A projekciós képek rögzítése és azok minősége közvetlenül befolyásolja a rekonstruált térfogati kép minőségét. A projekciós képek kontrasztja és felbontása határozza meg a részletek és a különböző anyagok megkülönböztethetőségét. Az 7. ábra az XCT1-el és az NCT-vel készített projekciós képek közül látható egy-egy. A képeken a vizsgálati darab és a kalibrációs fantom együtt látható. A gömbök anyaga jobban elnyeli a röntgensugárzást, mint a Ti6Al4V ötvözet, ezért a projekciós képen ezek sötétebbnek látszanak. A neutronsugárzást viszont a Ti6Al4V ötvözet nyeli el jobban, mint a gömbök anyaga, ezért azok világosabbak.

A 8. ábrán a rekonstruált térfogati képek egy-egy metszete látható az XCT1 és az NCT felvételekből. Az XCT1 keresztmetszeti képén látható a sugárkeményedésből származó műtermék (olyan képi jelenség, ami a valós darabon nincs, de a térfogati képen valamilyen okból megjelenik), ami a vizsgálati darabok külső kontúrja közelében világosabb szürkéséget okoz mind a Ti6Al4V

ötvözet, mind a gömbök esetében. Az XCT1 keresztmetszeti képen a gömb közelében szóródási műtermék is látható. Az NCT keresztmetszeti képén ezzel szemben nem látható szóródás és sugárkeményedés sem, viszont a Ti6Al4V ötvözetben a vizsgálati darab vastagabb keresztmetszetében kiterjedt méretű zajos rész látható.



7. ábra: a) XCT1 rendszerrel készült projekciós kép, b) NCT rendszerrel készült projekciós kép



8. ábra: a) XCT1 rendszerrel készült térfigati kép egy metszete, b) NCT rendszerrel készült térfigati kép egy metszete

4.5.2 A kalibrációs fantom mérési eredményei

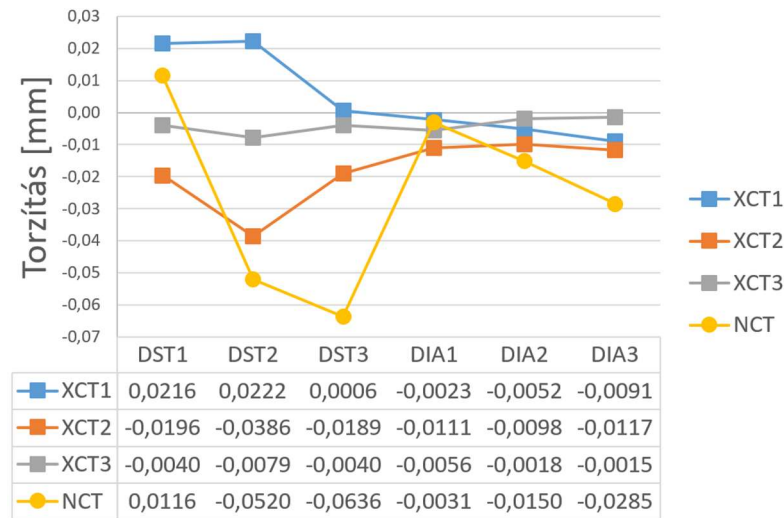
A kalibrációs fantom eredményeit a CT-rendszerek bizonytalanságainak meghatározásához használtam. A G10-es osztálypontosságú ZrO_2 gömbök átmérő-toleranciája $\pm 9,75 \mu\text{m}$. Az egyes

gömbök legnagyobb és legkisebb átmérője közötti különbség (a gömbtől való eltérés) legfeljebb $0,25\text{ }\mu\text{m}$. Egy tételen belüli átmérő-ingadozás legfeljebb $0,5\text{ }\mu\text{m}$ [184]. A gömbök középpontjai közötti távolságok mérési hibái a 3. mellékletben láthatók. Az XCT1 mérési hibája $0,001\text{ mm}$ és $0,022\text{ mm}$ között változik, és minden távolságon pozitív mérési hibát mutat. Az XCT2 hibája $-0,039\text{ mm}$ és $-0,019\text{ mm}$ között van. Az XCT2 eredményeit megfigyelve a legnagyobb méretnél (DST2) a mérési hiba $-0,039\text{ mm}$ -re adódik, ami közel a duplája a másik két méretéhez képest (DST1 és DST3). Mivel a DST1 és a DST3 nagyjából a fele a DST2 méretének, arra lehet következtetni, hogy a rendszernek egy lineáris skálázási hibája van a voxeltérfogaton, ami azt jelenti, hogy a projekciós képek készítésénél a detektor pixeleinek mérete az adott nagyításban nem volt megfelelően kalibrálva. Az XCT3 esetén a hiba $-0,008\text{ mm}$ és $-0,004\text{ mm}$ közé esik. Az NCT hibája $-0,064\text{ mm}$ és $0,012\text{ mm}$ között változik. Az XCT3 mérte a távolságokat a legnagyobb pontossággal a CMM által meghatározott referenciaértékekhez képest. A gömbátmérők mérési hibái azt mutatják, hogy minden CT-rendszer alulbecsülte az átmérőket, ami negatív mérési hibákat eredményezett. A mérési hiba legszűkebb terjedelme az XCT2 esetében látható, ami $-0,012\text{ mm}$ -től $-0,010\text{ mm}$ -ig terjed. A metrológiai XCT berendezések (XCT2 és XCT3) rendelkeztek a legkisebb mérési hibatarománnyal, ezt követi XCT3 és az NCT.

A 3. mellékletben láthatók a standard bizonytalansági tényezők és az U_0 értékei az egyes CT gépeknél és jellemzőknél. Az eredmények jó alapot nyújtanak az XCT és NCT rendszerek összehasonlításához. Az XCT1 nagyobb mérési hibát mutat az XCT3-hoz képest a DST1 és DST2 méretek esetében. A DST3 méretet az XCT1 $0,001\text{ mm}$ hibával mérte. Az XCT2 és XCT3 mérési hibája egyenesen arányos a mért méret hosszával.

A CT rendszerekre számított torzítás viszonylag nagy volt a Micromex (XCT1), a Vtomex (XCT2) és az NCT esetében. Ahogy a 9. ábra szemlélteti, a Tomoscope XS (XCT3) mutatta a legalacsonyabb torzítást az összes mérés során. Az ábrán az adatpontokat azért kötöttem össze, hogy az egyes CT rendszerekhez tartozó eredmények könnyebben elkülöníthetők legyenek. Továbbá a középpontok közötti távolságok (DST1–3) esetében megfigyelt torzítás nagyobb volt, mint a gömbátmérők (DIA1–3) esetében.

Ebben a vizsgálatban a torzítást mind a DST1–3, mind a DIA1–3 esetében kiszámítottam, és az egyes kategóriákon belül a legnagyobb torzítást használtam fel. Fontos megjegyezni, hogy minden CT rendszerrel csupán egyetlen mérést végeztem, ezért a mért értékekre nem alkalmaztam átlagolást.



9. ábra: A CT rendszerek torzítása az kalibrációs fantomon mért eredményekből számolva

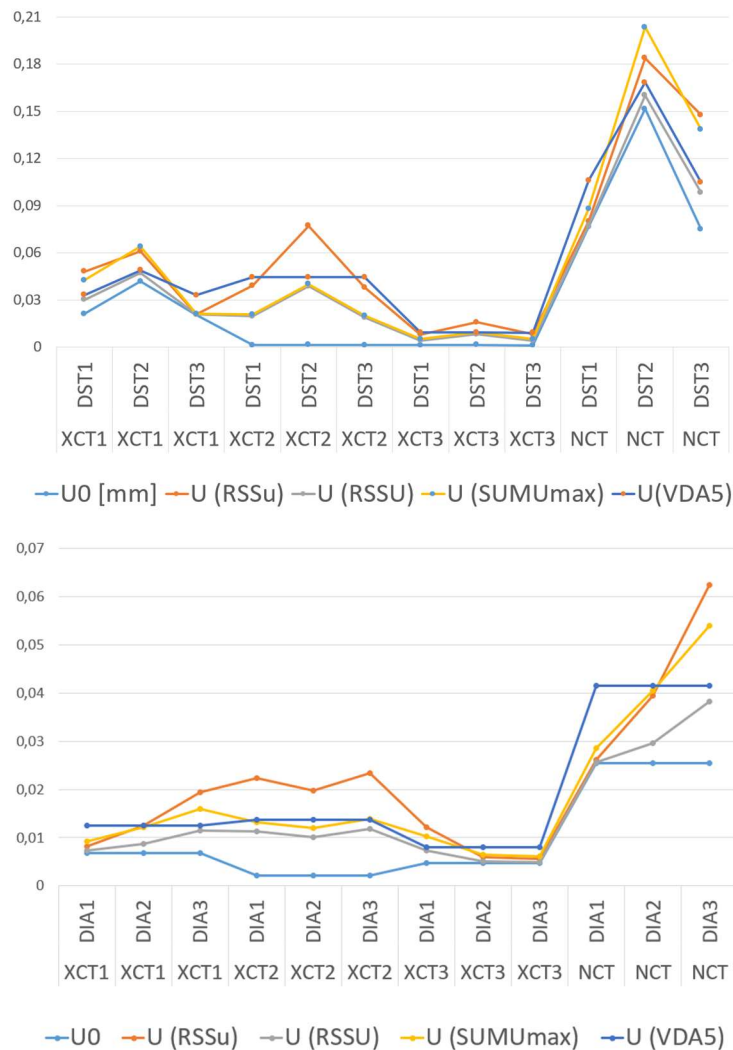
Az méréseket azért nem ismételtam, mert az NCT-vel egyetlen mérésre volt lehetőségem annak magas költségei és a nehéz hozzáférhetőség miatt. Az XCT rendszerekkel végeztem előkísérleteket, melyeknél a kalibrációs fantomot mértem, de nem tapasztaltam eltérést a mérési eredmények között, ezért mindegyik CT rendszernél azt a voxeltérfigatott használtam fel a mérésekhez, melyeken a kalibrációs fantom és a vizsgálati darab együtt szerepelt.

A vizsgálat során öt különböző típusú kiterjesztett mérési bizonytalanság-számítást alkalmaztam, úgymint U_0 (a torzítás figyelembevétele nélkül), U_{RSSu_c} , U_{RSSU} , $U_{SUMU_{max}}$, U_{VDA5} . A torzítás figyelembevételének a módszere a bizonytalanságbecslésben folyamatos vita tárgyát képezi a szakirodalomban [204]. Amíg a GUM [196] ajánlása alapján minden torzítást ki kell küszöbölni vagy korrigálni kell, addig a gyakorlati megközelítésben akkora kiterjesztett mérési bizonytalanságot határoznak meg, ami magában foglalja a szisztematikus és a véletlenszerű bizonytalansági tényezőket is [198, 199].

A torzítást is figyelembe vevő kiterjesztett mérési bizonytalanság-számítási módszereknek megvannak a specifikus alkalmazási területei és jellemzői. Az $RSSu_c$ és $RSSU$ módszerek általánosabbak és konzervatívabbak, míg a $SUMU_{max}$ egy célzottabb megközelítést nyújt a torzítás közvetlen figyelembevételéhez. A VDA 5 [203] az autóiparra szabott módszer, ami biztosítja a gyakorlati alkalmazhatóságot és megbízhatóságot a mérési folyamatokban.

A kiterjesztett mérési bizonytalanság számítási módszerének jelentős hatása van a mérési eredmények megbízhatóságára és értelmezésére a műszaki és egyéb területeken. Az olyan módszerek, mint az $RSSu_c$, $RSSU$, $SUMU_{max}$ és VDA 5 abban különböznek, hogy hogyan veszik figyelembe a torzítást, a szisztematikus hibákat és az ingadozást, ami eltérő bizonytalansági

értékekhez vezet [198]. Ezek a különbségek befolyásolhatják, hogy egy terméket jónak vagy selejtnak ítélnék, hogy egy folyamatot megfelelőnek minősítsenek-e, vagy hogy szükség van-e további ellenőrzésekre. Egy konzervatívabb módszer, mint az $RSSu_c$, túltervezéshez és megnövekedő költségekhez vezethet, míg egy szűkebb kiterjesztett mérési bizonytalanságot adó módszer, mint a $SUMU_{max}$ kockáztatja egy kritikus eltérés felderíthetlenségét. Az olyan iparágakban, mint az autóipar, ahol a szabályozási előírások szigorúak, a módszer megválasztása meghatározhatja a megfelelést, befolyásolhatja az auditok kimenetelét és hatással lehet a piaci részesedésre.



10. ábra: A kiterjesztett mérési bizonytalanságok méretenként és CT berendezésenként csoportosítva

A kiszámolt kiterjesztett mérési bizonytalanságokat a 10. ábra szemlélteti. Az ábrán az adatpontok összekötése csak a jobb vizuális tájékozódást és elkülönítést segíti. A számításoknál $k = 2$ kiterjesztési tényezőt alkalmaztam, ami körülbelül 95%-os lefedettségű szintet ad, feltételezve, hogy a mérési bizonytalanság normál eloszlású. Az XCT rendszerek kiterjesztett mérési

bizonytalansága kisebb, mint az NCT rendszeré. A két metrológiai XCT rendszer (XCT2 és XCT3) jobb telejsítményt nyújtott az XCT1-hez képest. A két metrológiai XCT berendezés a torzítás figyelembevétele nélkül kicsi kiterjesztett mérési bizonytalanságot mutat. Viszont amikor a torzítást is figyelembe vevő kiterjesztett mérési bizonytalanságokat megfigyeljük, láthatjuk, hogy minden mérőrendszerénél megnő a kiterjesztett mérési bizonytalanság. Ebből azt a következtetést vontam le, hogy a torzítást fontos figyelembe venni a kiterjesztett mérési bizonytalanságok számításánál.

4.5.3 A röntgen- és neutrontomográfias rendszerek mérési képességének összehasonlítása

A különböző mérési eljárások metrológiai összehasonlítása többféle módszerrel végezhető el, mint ahogy azt a [205, 206] szabványok leírják és amiket akkreditált kalibrálólaboratóriumok a gyakorlatban is alkalmaznak.

Az egyik ilyen módszer az E_N érték kiszámítása, amely számszerűsíti a két mérőrendszerből (1-es és 2-es jelöléssel) kapott eredmények közötti egyezés mértékét. Ez a megközelítés figyelembe veszi mind a mért értékeket (y_1 és y_2), mind a hozzájuk tartozó kiterjesztett mérési bizonytalanságokat (U_1 és U_2), és a következő általános kifejezéssel adható meg:

$$E_N = \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (24)$$

Az $|E_N|$ küszöbértéke [205, 206] szerint 1, ami körülbelül 95%-os megbízhatósági szintnek felel meg. Ha $|E_N| < 1$, akkor két mérés és mérőrendszer között nincs szignifikáns különbség, vagyis azok statisztikailag azonosak.

A metrológiai összehasonlítások célja, hogy az $|E_N|$ érték minél közelebb legyen a nullához, ami erős egyezőséget jelent a két rendszer között. A küszöbértékhez közeli eredmények esetében a rendszerek körültekintő elemzést igényelnek annak megállapítására, hogy a különbségek szisztematikus hatásoknak, a bizonytalanság alulbecslésének vagy más befolyásoló tényezőnek tudhatók-e be [206].

A mérőrendszerek E_N szám alapján történő összehasonlításának vannak erősségei és korlátai is. Villarraga és társai [200, 207] szerint az E_N érték ideális körülmények között hatékony lehet, a valós összehasonlításokban – különösen azokon a területeken, ahol a bizonytalanság-számítási módszerek még fejlődésben vannak – körültekintéssel kell alkalmazni. Ilyen helyzetekben az egyszerűbb mérőszámok valósabb képet mutathatnak a rendszerek metrológiai teljesítményükről.

Ahhoz, hogy az XCT és NCT rendszereket összehasonlítsam metrológiai szempontból, az E_N számokat használtam. Az XCT és NCT rendszerek mérési eredményeit először a referenciaértékekkel hasonlítottam össze a következő egyenlet alapján:

$$E_N = \frac{y_{i,j} - y_{ref,i,j}}{\sqrt{U_{i,j,k}^2 + U_{ref,i,j,k}^2}} \quad (25)$$

Ahol $y_{i,j}$ az i -edik CT rendszerrel mért j -edik jellemzőnek a mérési eredményét és $y_{ref,i,j}$ a hozzá tartozó referenciaértéket jelenti. $U_{i,j}$ és $U_{ref,i,j}$ a kiterjesztett mérési bizonytalanságot jelentik. Az i index a CT rendszert jelöli: 1: Micromex, 2: Vtomex M, 3: Tomoscope XS és 4: NCT), míg a j index a mért jellemzőt jelöli: 1: DST1, 2: DST2, 3: DST3, 4: DIA1, 5: DIA2 és 6: DIA3. A k index az alkalmazott kiterjesztett mérési bizonytalanság-számítási módszert jelöli: 1: U_0 , 2: U_{RSSu_c} , 3: U_{RSSu} , 4: $U_{SUMU_{max}}$ és 5: U_{VD} .

Az összehasonlítás eredményei azt mutatják, hogy a torzítás nélküli (U_0) kiterjesztett mérési bizonytalanságokkal számított E_N értékek -20,08 és 1,02 között változnak (4. táblázat). A nagy E_N értékek jelentős szisztematikus hiba jelenlétére utalnak.

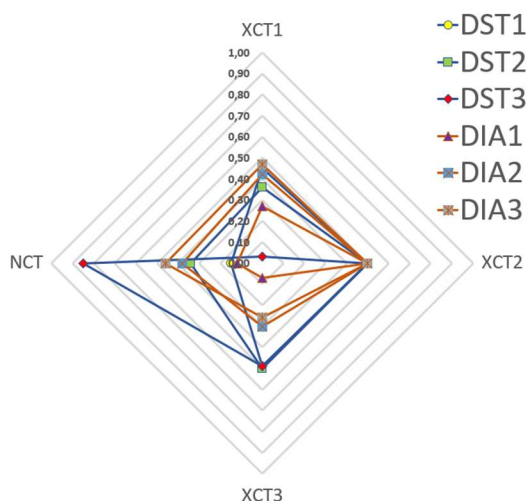
4. táblázat: A kiszámolt E_N értékek a referencia és a CT rendszerek összehasonlításából

Méret	XCT1	XCT2	XCT3	NCT
DST1	1,02	-11,92	-2,44	0,15
DST2	0,53	-20,08	-4,23	-0,34
DST3	0,03	-11,56	-2,49	-0,85
DIA1	-0,33	-4,63	-0,07	-0,12
DIA2	-0,75	-4,11	-0,38	-0,59
DIA3	-1,3	-4,88	-0,3	-1,12

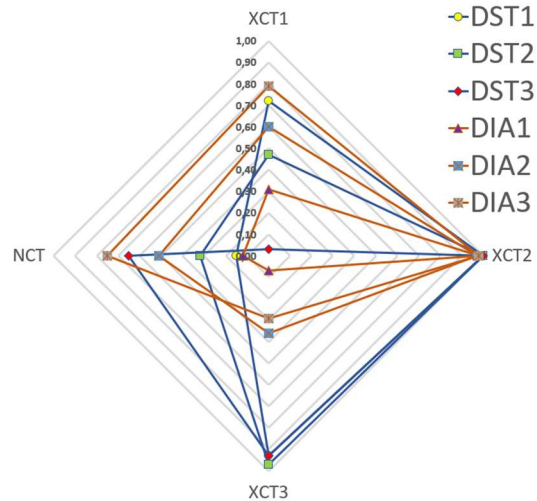
Amikor a torzítást a kiterjesztett mérési bizonytalanságba az U_{RSSu_c} módszerrel vettem figyelembe, a legnagyobb $|E_N|$ érték 0,85 volt az NCT esetében a DST3 távolságot mérve, ahogy azt a 11/a ábra mutatja. A 11/b ábrán látható pókdíagram az U_{RSSu} módszerrel számított $|E_N|$ értékeket szemlélteti, amelyek 0,03 és 1,00 közé esnek. A 11/c ábra az $U_{SUMU_{max}}$ megközelítéssel számolt $|E_N|$ értékeket mutatja, mely értékei 0,03 és 0,96 között vannak. A 11/d ábra szemlélteti az U_{VD} módszerrel számított $|E_N|$ értékeket, melyek a 0,02-0,87 tartományban vannak.

Ha a különböző módszerekkel számított kiterjesztett mérési bizonytalanságok összehasonlításához kiszámolt $|E_N|$ értékeket megfigyelve azt láthatjuk, hogy a

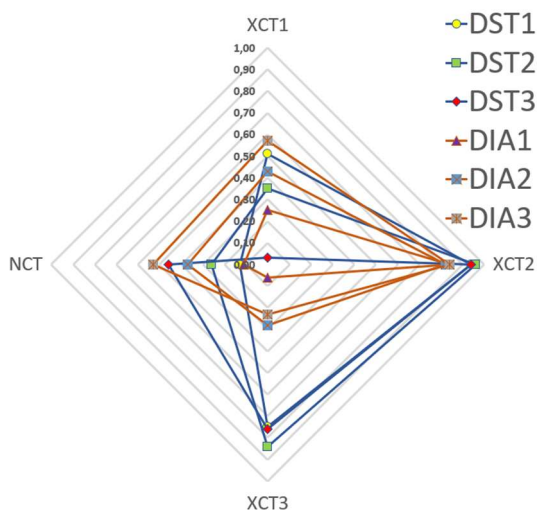
legkiegyensúlyozottabb eredményeket az U_{VDA5} módszer adja mind a távolságok, mind az átmérők esetében. Az U_{RSSu_c} módszer többnyire túlbecsüli a kiterjesztett mérési bizonytalanságot, ezáltal az $|E_N|$ értékek alacsonyok. Egyedül a DST3 esetében láthatunk 0,85-ös értéket, a többi jellemző esetében az $|E_N|$ szám 0,6 alatt marad. Ebből látszik, hogy a torzításkorrekció fontos eleme a kiterjesztett mérési bizonytalanság kiszámításánál.



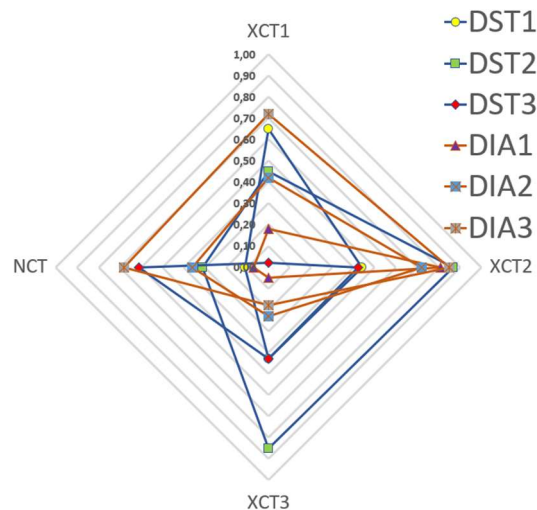
a) $|E_N|$ számok az U_{RSSu} módszerrel



b) $|E_N|$ számok az U_{RSSu} módszerrel



c) $|E_N|$ számok az $U_{SUMUmax}$ módszerrel



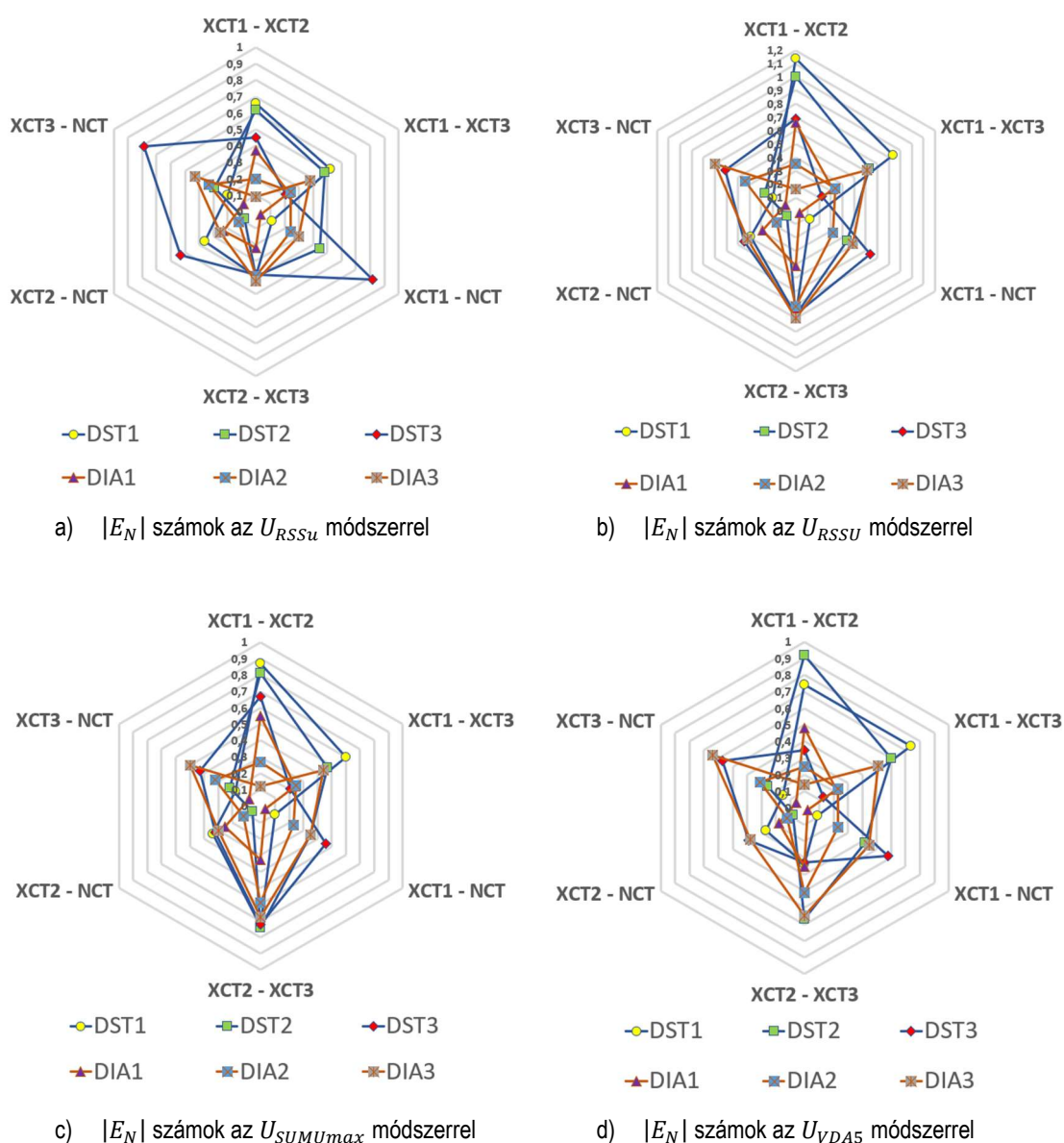
d) $|E_N|$ számok az U_{VDA5} módszerrel

11. ábra: A CT berendezések összehasonlítása az E_N számok abszolút értéke alapján a referenciával

A CT rendszerek referenciaértékekkel való összehasonlításán túl páronkénti összehasonlításokat is végeztem a CT rendszerek között. A gépek páronkénti összehasonlításához a vizsgálati darab L1-6 méreteit használtam fel. Két CT rendszer összehasonlítására szolgáló E_N számot a következőképpen számítottam ki:

$$E_N = \frac{y_{i,j} - y_{i',j}}{\sqrt{U_{i,j,k}^2 + U_{i',j,k}^2}} \quad (26)$$

Ahol i és i' két különböző CT rendszert jelent, j jelöli a mért jellemzőt (DST1-DST3 és DIA1-DIA3) és k jelöli a kiterjesztett mérési bizonytalanság számításának módszerét: 1: U_0 , 2: U_{RSSu_c} , 3: U_{RSSu} , 4: $U_{SUMU_{max}}$ és 5: U_{VDA5} .



12. ábra: A CT berendezések páronkénti összehasonlítása az E_N számok abszolút értéke alapján a kalibrációs fantom eredményeivel

A torzítás figyelembevétele nélkül az $|E_N|$ értékek 0,03 és 14,6 között helyezkednek el, ami rossz egyezőségre utal a méréseknél. Az U_{RSSu_c} módszerrel számolt kiterjesztett mérési bizonytalanságokkal a legnagyobb $|E_N|$ érték 0,82 az XCT1 és az NCT között a DST3 esetében (10/a ábra). Az U_{RSSU} esetében a legnagyobb $|E_N|$ érték 1,14 (10/b ábra). Az $U_{SUMU_{max}}$ módszerrel számolt legnagyobb $|E_N|$ érték 0,87, míg az U_{VDA5} módszernél 0,92.

Az eredmények jól szemléltetik a torzítás figyelembevételének fontosságát a kiterjesztett mérési bizonytalanság számításánál.

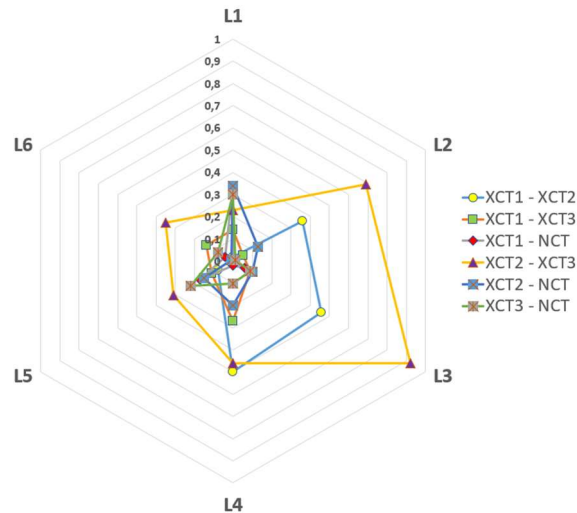
4.6 A vizsgálati darab eredményei

A vizsgálati darabon egy merőleges síkfelületekkel határolt horony található, amelyben hat különálló hosszt (4. ábra) mértem meg a síkok között. Bár jól ismert tény, hogy a síkfelületek közötti bidirekcionális mérések – az olyan további térbeli hatások miatt, mint a szögbeli eltérés és a felületi alakeltérések [208] – jellegükben különböznek a gömbközpontok közötti unidirekcionális mérésektől. Ezért a vizsgálat során egy egyszerűsített megközelítést alkalmaztam. Ez az egyszerűsítés ugyanakkor szisztematikus hibát vihet a modellbe. A síkok valós alakeltérései (például a felületi egyenetlenségek) és a darab mérés közbeni dőlése közvetlenül befolyásolják a szoftveres felületmeghatározást. Mivel a bidirekcionális mérések kifejezetten érzékenyek az ilyen geometriai pontatlanságokra, a lokális felületi hibák torzíthatják a síkok távolságát. Ez a hatás végső soron kismértékben alul- vagy túlbecsülheti a kiterjesztett mérési bizonytalanságot. A mérési hiba és a kiterjesztett mérési bizonytalanságok a 4. mellékletben találhatók. A kiterjesztett mérési bizonytalanságokat a különböző módszerekkel a kalibrációs fantom korábban meghatározott kiterjesztett mérési bizonytalanságaiból, azaz a DST1, DST2 és DST3 bizonytalanságainak négyzetes középértékéből számítottam ki.

Az eredményekből látható, hogy az NCT rendszer lényegesen nagyobb mérési hibákat mutat az L1, L4 és L5 hosszúságok esetében a röntgen XCT rendszerekkel ellentétben. Az L2, L3 és L6 hosszúságok esetében a CT rendszerek mérési teljesítménye kiegyensúlyozottabbnak tűnik. Azonban a 4. hosszúság a többi hosszúsághoz képest eltérően viselkedik a méréseknél, vélhetően felületi hibák vagy helyi anyaginhomogenitás miatt. Ezeket az eltéréseket valószínűleg a vizsgálati darab előállításához használt AM eljárás korlátozott geometriai pontossága okozza.

Azt, hogy metrológiailag a különböző CT rendszerek eredményei mennyire tekinthetők egyformának, páronkénti $|E_N|$ értékekkel vizsgáltam. Az összehasonlításban már csak az U_{VDA5} módszerrel számolt kiterjesztett mérési bizonytalanságot használtam fel, annak kiegyensúlyozott

eredményei miatt. A számított eredmények az 13. ábrán láthatók. A legnagyobb $|E_N|$ értékeket az XCT2 és az XCT3 közötti összehasonlításnál tapasztaltam, azonban az összes $|E_N|$ érték 1 alatti, ami azt jelenti, hogy metrológiai szempontból az eredmények nem különböznek szignifikánsan.



13. ábra: A CT berendezések páronkénti összehasonlítása az E_N számok abszolút értéke alapján a vizsgálati darab mérési eredményeivel

Az ismételhetőségre, hőmérsékletre és torzításra vonatkozó bemeneti szórások meghatározása a kísérletek során megfigyelt változásokon és környezeti feltételeken alapult. A torzítás figyelembevételénél a VDA 5 irányelveit alkalmaztam, ahol a torzítás szisztematikus tagként szerepel a bizonytalansági büdzsében. Annak érdekében, hogy a lefedettség megfelelő legyen amikor a torzítás jelentős, a VDA 5 irányelv a bizonytalanság kiterjesztését javasolja a torzítás és a hozzá kapcsolódó bizonytalanság bevonásával.

4.7 Következtetések

A 4. fejezetben bemutatott kutatás célja az XCT és NCT metrológiai összehasonlítása volt. A kutatás fő kérdése az volt, hogy az NCT rendszer mérési képessége összevethető-e a különböző minőségi és árkategóriájú XCT rendszerekével. Ennek megválaszolásához egyedi kalibrációs fantomot és vizsgálati darabot terveztem és gyártattam le olyan anyagokból (ZrO_2 , $Ti6Al4V$ ötvözet), amelyek mindkét képalkotási eljárásához megfelelőek, és a neutronsugárzás hatására az aktivitás nem növekszik határérték feletti szintre.

A kutatás során három különböző XCT rendszerrel és egy NCT rendszerrel végeztem méréseket a kalibrációs fantomon és a vizsgálati darabon, a referenciaértékeket pedig egy nagy pontosságú tapintós CMM-mel határoztam meg. A kiértékeléshez egy részletes mérési modellt dolgoztam ki, amelyben különös hangsúlyt fektettem a mérési torzítás hatásának vizsgálatára a kiterjesztett

mérési bizonytalanság számításában. Négy különböző módszert (U_{RSSu} , U_{RSSU} , U_{SUMU} , U_{VDA5}) alkalmaztam a torzítás figyelembevételére. A rendszerek metrológiai összehasonlítását az E_N számok segítségével végeztem el.

A vizsgálat eredményei rámutattak, hogy a torzítás figyelmen kívül hagyása esetén a CT rendszerek között szignifikáns eltérések mutatkoznak. Azonban a torzítás megfelelő beépítése a bizonytalansági modellbe – különösen a VDA 5 ajánlás szerinti (U_{VDA5}) módszerrel – azt mutatta, hogy mind a négy vizsgált CT rendszer (három XCT és egy NCT) statisztikailag összehasonlítható metrológiai eredményeket szolgáltat, mivel az E_N értékek abszolút értéke minden esetben 1 alatti. A kutatás rávilágított, hogy bár az NCT rendszer mérési hibája és bizonytalansága nagyobb a metrológiai XCT berendezésekéhez képest, a torzítást is magában foglaló bizonytalanságszámítás alkalmazásával az NCT által szolgáltatott eredmények metrológiai szempontból statisztikailag összehasonlíthatónak tekinthetők a vizsgált XCT rendszerek eredményeivel.

A bemutatott összehasonlító módszertan és a kiterjesztett mérési bizonytalanságok számszerű értékei, így például az NCT esetében számított 0,092 milliméteres érték, közvetlenül a vizsgált geometriai tartományra, vagyis a 21 és 43 milliméter közötti gömbközéppont-távolságokra, valamint a Budapesti Neutron Centrum RAD állomásának specifikus fizikai paramétereire vonatkoznak. Ugyanakkor az alkalmazott módszertan elvi alapjai, köztük a cirkónium-dioxid és a titánötvözet párosításán alapuló, alacsony aktivációjú etalon koncepciója, valamint a bizonytalanságnak a VDA 5 ajánlás szerinti figyelembevétele, általános érvényűnek tekinthetők. Ezek az elvek bármely más, termikus vagy hideg neutronforrással működő neutrontomográfias rendszer esetében sikerrel alkalmazhatók, amennyiben a vizsgált minták áthatolási úthossza nem haladja meg az adott neutronnyaláb transzmissziós határát.

5 Röntgentomográfiával történő dimenzionális mérések vizsgálata két anyagból felépülő alkatrészénél

5.1 Vizsgálati darab tervezése és gyártása

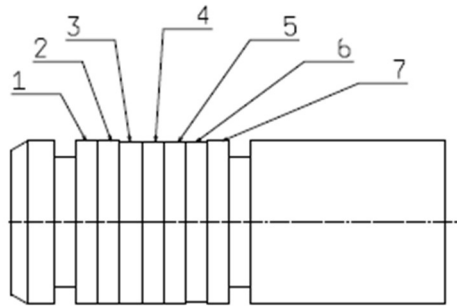
Az iparban nagyon gyakoriak az olyan mérési feladatok, ahol műanyag és fém alkatrészekből összeszerelt egységet kell mérni, vizsgálni. Ilyen alkatrészek például a csatlakozók, melyeknél jellemzően egy műanyag házban valamilyen fémből készült vezetősín helyezkedik el. Az ilyen fémből és műanyagból felépülő alkatrészek XCT-vel történő vizsgálata jelentős kihívásokat rejt. A problémát az okozza, hogy a rekonstruált voxeltérfogatban a fém szűrkeségi értéke nagy, míg a műanyagé nagyon alacsony, a háttérrel majdnem megegyező értékű. Emellett a fém alkatrészek felületén a röntgensugárzás szóródik, és a voxeltérfogatban a mérés pontosságát rontó képi műtermékek keletkeznek.

A vizsgálathoz olyan anyagokat választottam, amiket könnyű megmunkálni és könnyen áthatol rajtuk a röntgensugárzás és különböző mértékű elnyelődési tényezővel rendelkeznek. A választott anyagok az alumínium és a polioximetilén (POM).

Az alumínium olyan fém, amin viszonylag könnyen áthatol a röntgensugárzás a többi fémhez képest, így nagyobb keresztmetszetű vizsgálati darabok is vizsgálhatók XCT rendszerrel. Az AlMgSi1 alumíniumötvözetet választottam a kísérlethez a könnyű beszerezhetősége és megmunkálhatósága miatt. A POM egy széles körben alkalmazott műszaki műanyag, aminek nagy a kopásállósága, kevésbé hajlamos kúszásra és alacsony a súrlódása. Ezek miatt gyártanak belőle fogaskerekeket, precíziós eszközöket és nagy terhelhetőségű csúszkákat.

Az alumínium testbe egy MNS 500 CNC marógéppel hat furatot készítettem. A furatok közül hármat 20 mm-es, hármat 15 mm-es átmérővel készítettem. A furatokat H7-es tűrésűre gyártottam.

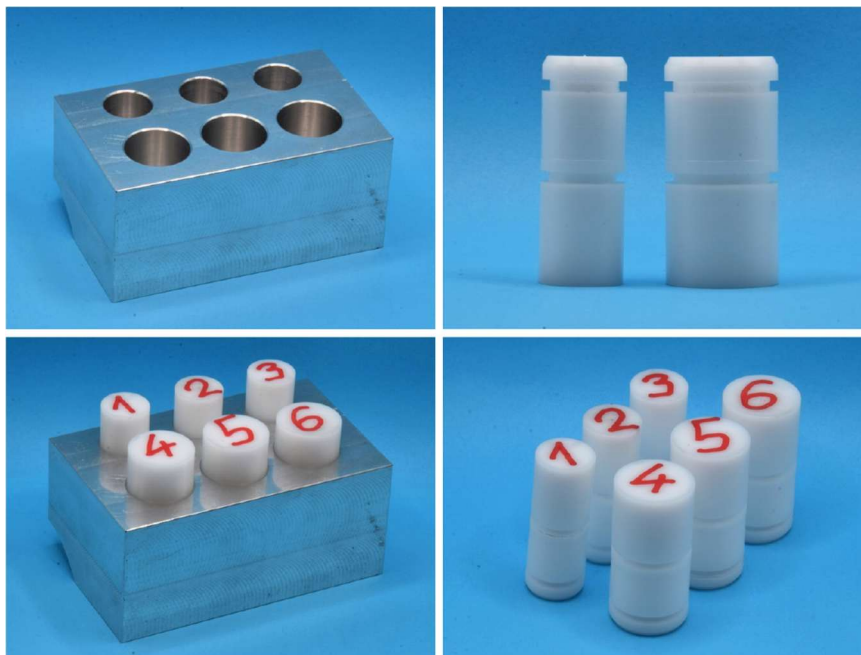
A furatokba illeszkedő csapokat POM-ból gyártottam le. A csapok legnagyobb átmérőjét akkorára gyártottam, hogy az alumínium test furataiba kicsi erőfelfejtással bele tudjam csúsztatni őket, de ne legyen játéuk. A POM csapokon található két mélyebb beszúrás, amik között hét lépcsőzetesen változó átmérőjű hengeres palástfelületet alakítottam ki. Az 1-es és a 7-es szegmens (14. ábra) a névleges átmérőre készült, a 2-es, 3-as, 4-es, 5-ös és 6-os szegmensek átmérői névlegesen 0,05 mm-el csökkennek. Ezáltal vizsgálati darabban, összeszerelt állapotban a az alumínium furatok palástja és a POM csapok szegmensei között kontrollált vastagságú levegőrészek találhatók. A POM csapokat EUROturn 12B CNC esztergán gyártottam le.



14. ábra: A POM csapok szegmenseinek az elnevezése

A vizsgálati darabokon háromféle állapotban készítettem XCT felvételeket:

- az alumínium darabról (alumínium test kiértékelése egyanyagú, vagyis SM esetben),
- a POM csapokról (POM csapok kiértékelése SM esetben),
- az alumínium darabról és a POM csapokról összeszerelt állapotban (az alumínium test kiértékelése többanyagú, vagyis MM esetben és a POM csapok kiértékelése MM esetben).



15. ábra: Az alumínium test és a POM csapok egy anyagú (SM) és több anyagú (MM) konfigurációi

Az a és a b esetben az XCT munkaterében egy anyagból (single material, SM) álló vizsgálati darabokról készültek a felvételek, míg a c esetben több anyagból (multi material, MM) álló vizsgálati darabokat szkenneltem. Az alumínium test és a POM csapok különböző konfiguráció a 15. ábrán láthatók.

5.2 Referenciamérések

A referenciaméréseket egy Aberlink Horizon 800 tapintós koordináta-métőgéppel végeztem. A mérőgép kalibrálási jegyzőkönyve szerint az $MPE(E0: -1D, -2D, -3D) = 1,75 + L_{mm}/250 \text{ } \mu\text{m}$ az ISO 10360 szabvány szerint. Az alumínium darab méréséhez 4 mm átmérőjű rubin tapintót használtam. Az alumínium darab furataiban azokban a furattengelyre merőleges síkokban történtek a mérési szkennelőtapintások, amelyek az összeszerelt állapotban a POM csapok egyes szegmenseinek a középvonalával egybeesnek. A körök mérése során az alumínium furatok tengelyét határoztam meg először és ezt használtam bázisnak a tapintási síkok meghatározásához. Erre azért volt szükség, hogy a hengeres felületek tengelyére merőleges síkokban történjenek a tapintások. A mért pontokra a legkisebb négyzetes eltérések módszerével illesztettem köröket és ezeknek az átmérőjét használtam, mint mérési eredmény. A teljes referenciamérést az alumínium darabon háromszor ismételtam és a referenciaértékként ezeknek az átlagát használtam fel.

A POM csapok referenciamérésénél szintén 4 mm-es rubin tapintót használtam. A szegmensek középvonalában szkenneltem körbe a tapintóval a POM csapokat. A szkennelés síkjainak meghatározásához a csapokon található legnagyobb hengeres felület tengelyét használtam bázisként. A referenciamérést mind a hat csapon megismételtam háromszor és az ismételt mérések átlagát használtam, mint referenciaérték.

5.3 Röntgentomográfiás mérések és kísérlettervezés

Az XCT méréseket egy Tomoscope XS PLUS 160 gépen végeztem. A gép kalibrálását a gyártó az ISO 10360 szabvány és a VDI 2617 ajánlás szerint végzi. A gép kalibrálási jegyzőkönyve alapján teljesíti az $MPE(E3) = 4,5 + L_{mm}/75 \text{ } \mu\text{m}$ feltételt.

Az XCT szkennelések során a röntgenső gyorsítófeszültségét és az áramerősséget állandó értékre állítottam be, 160 kV-ra és 0,5 mA, ami 80 W teljesítményt eredményezett. Az összes mérés során úgy végeztem a felvételek készítését, hogy a detektor felületére a teljes vizsgálati darab vetületi képe ráférjen. A felvételkedészítés során a 360°-os körbeforgatás közben 8000 projekciós kép készült. A röntgenső fókuszfoltja elé 0,5 mm vastag ón (Sn) szűrőt tettem az összes szkennelés során. A felvételkedészítések alatt a vizsgálati darabokat műhabban rögzítettem enyhén megdőntve. A szkennelések között három paramétert változtattam két szinten:

- detektorpixel-egyesítés/expozíciós idő [ms] (2x2/120; 1x1/250),
- ablakszélesség [mm] (190; 175),

c. forgatási mód (folyamatos; szakaszos).

Az detektorpixel-egyesítés azt jelenti, hogy a detektoron 2x2 pixel összevonható egy pixellé. Ennek az az előnye, hogy nagyobb egységnyi felületű lesz egy pixel, vagyis nő az egységnyi felületre eső röntgenfotonok száma, emiatt nő a detektor érzékenysége a felbontás romlása mellett. Az ablakszélesség összefügg a rendszer geometriai nagyításával. A rendszer geometriai nagyítása a forgatótengely röntgencső és a detektor közötti helyzetének változtatásával állítható. Az ablakszélesség a forgatóasztal tengelyével egybeeső, detektorral párhuzamos síkra vetülő detektorszélességet jelenti. Az XCT rendszer forgatóasztala a projekciós képek készítése közben körbe tud fordulni folyamatos mozgással és úgy is, hogy minden egyes projekciós kép készítésénél megáll.

Az XCT szkennelési folyamatnál teljes faktoriális (2^3) kísérleti tervet alkalmaztam [209], melynél nyolc különböző paraméterbeállítást használtam és a paramétereket véletlenszerűen változtattam (5. táblázat). A szkennelési szekvenciát, mind a nyolc paraméterbeállítással lefuttattam az alumínium darabon, a POM csapokon és az összeszerelt vizsgálati darabon. Ez összesen 24 szkennelést jelent.

5. táblázat: A szkennelési paraméterek véletlenszerű sorrendben változtatva

Beállítás	A: detektorpixel-egyesítés/ expozíciós idő [ms]	B: ablakszélesség [mm]	C: forgatási mód
1	2x2/120	175	szakaszos
2	2x2/120	175	folyamatos
3	2x2/120	190	folyamatos
4	1x1/250	175	folyamatos
5	1x1/250	190	folyamatos
6	2x2/120	190	szakaszos
7	1x1/250	190	szakaszos
8	1x1/250	175	szakaszos

A dimenzionális mérések körök átmérőinek méréséből állt a furatokban és a csapokon. A vizsgálati darabok különböző mérési módjai alapján a következő jellemzőket határoztam meg:

- $D_{Al,ref,i}$: az alumínium darab referenciaátmérői hét különböző mélységben CMM-mel mérve. A mérési mélységek a csapok behelyezése után kerültek meghatározásra. A furatban legmélyebben az 1-es, legmagasabban a 7-es szegmens helyezkedik el. A szegmenseket sorszámaát az i jelöli.
- $D_{Al,SM,i}$: az átmérők az alumínium darab furataiban a referenciamérésekkel megegyező magasságokban XCT-vel, SM esetben és i jelöli a szegmensek sorszámaát, ami a csapokéval megegyezik

- $D_{Al,MM,i}$: az átmérők az alumínium darab furataiban a referenciamérésekkel megegyező magasságokban XCT-vel, MM esetben és i jelöli a szegmensek sorszámát, ami a csapokéval megegyezik
- $D_{POM,ref,i}$: a POM csapok referenciaátmérői hét különböző szegmens középvonalában, CMM-mel mérve. A szegmenseket sorszámát az i jelöli.
- $D_{POM,SM,i}$: a POM csapok XCT méréseiből származó átmérőértékek a hét különböző szegmens középvonalában, SM esetben. A szegmenseket sorszámát az i jelöli.
- $D_{POM,MM,i}$: a POM csapok XCT méréseiből származó átmérőértékek a hét különböző szegmens középvonalában, MM esetben. A szegmenseket sorszámát az i jelöli.

Az átmérőértékek mérési hibáját (Measurement Error, ME) [197], vagyis a mért érték és a referenciaérték különbségét meghatároztam mindegyik i -edik szegmensre:

$$ME_{Al,SM,i} = D_{Al,SM,i} - D_{Al,ref,i}$$

$$ME_{Al,MM,i} = D_{Al,MM,i} - D_{Al,ref,i}$$

$$ME_{POM,SM,i} = D_{POM,SM,i} - D_{POM,ref,i}$$

$$ME_{POM,MM,i} = D_{POM,MM,i} - D_{POM,ref,i}$$

A beállítható paraméterekből véletlenszerű sorrendű szkennelési szekvenciát (5. táblázat) csináltam és Winwerth 10.45 szoftverben leprogramoztam. A felvét elkészítési programot lefuttattam az alumínium darabon, a POM csapokon és az összeszerelt állapotú vizsgálati darabon. A vizsgálati szekvencia lefuttatása négy órát vett igénybe, az összes felvét elkészítés egy nap alatt lezajlott. A szkennelési szekvenciák előtt a gép saját etalonjával kalibráltam a pixelméretet és a forgatóasztal tengelyének pozícióját.

Az alumínium darab és a POM csapok szkennelését követően, amikor a munkatérben csak egy anyagú vizsgálati tárgy volt, automatikus felületmeghatározással hoztam létre a felületi pontfelhőt. A meghatározott felületet ez után STL formátumban exportáltam ki a szoftverből. Az STL formátumot széles körben használják mérés technikai szoftverekben.

Az összeszerelt vizsgálati darabról készült térfogati képek alumíniumot és műanyagot is tartalmaznak a levegő mellett. Az ilyen különböző elnyelődési tényezővel rendelkező anyagból álló vizsgálati darabok szegmenseinek felületmeghatározása bonyolult feladat a CT-s technológiánál. Az egyes anyagok felületének meghatározását szűrkeségi értékek alapján végeztem a Winwerth 10.45 szoftverben. A szegmentálás során a voxeltérfogaton az egyes anyagokból egy

keresőablakkal meg kell határozni a szűrkeségi értékek tartományát, majd a tartományok beállítása után a szoftver automatikusan létrehozza az egyes anyagok felületét STL formátumban.

Azokat a szkenneléseket, amelyekben a vizsgálati darab egyetlen anyagból állt egyanyagú (single-material, SM), a többanyagból álló, összeszerelt vizsgálati darabos szkenneléseket többanyagú (multi-material, MM) szkenneléseknek neveztem el. Az alumínium darabhoz a szkenneléseket követően volt 8 darab SM STL és 8 darab MM STL pontfelhő. A POM csapok SM szkennelése során egy szkennelésben mind a hat csapról egyszerre készítettem a térfogati képet. Így a POM csapok STL-jei esetében SM esetben keletkezett $8 \times 6 = 48$ darab STL pontfelhő és MM esetben is ugyanennyi.

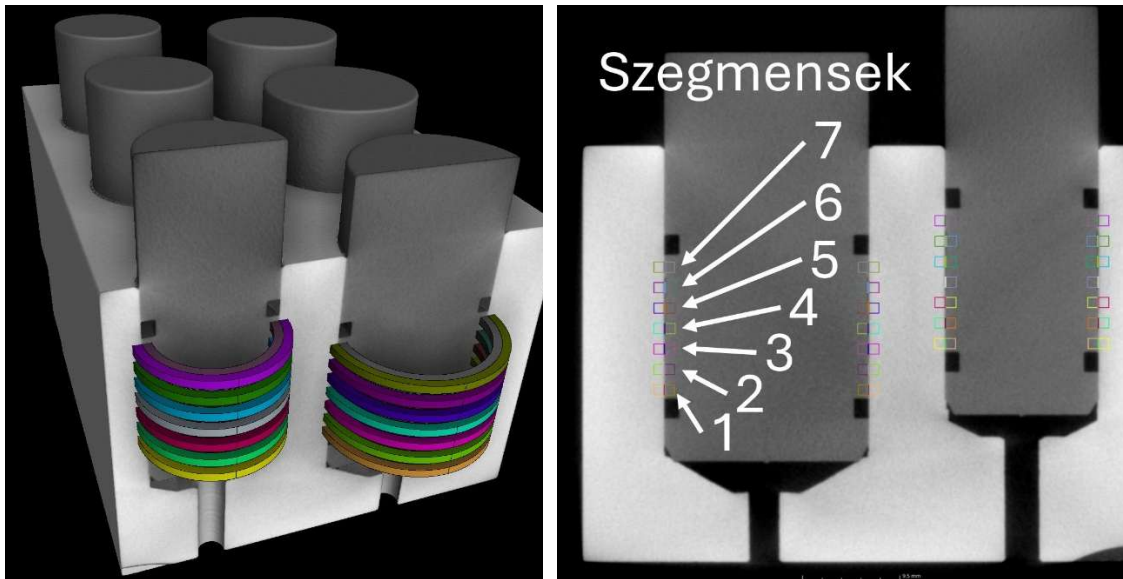
Az STL pontfelhők kiértékelése során az elsődleges bázist a hengeres felületek (furatok vagy csapok) tengelyei jelentették. Ezt követően az alumínium test furataiban a referenciamérésekkel megegyező pozíciókban metszeteket készítettem a pontfelhőkön és a kimetszet pontokra köröket illeszttem a legkisebb négyzetes eltérések módszerével. A mérési eredményeket ebben az esetben is az illesztett körök átmérője adta.

5.4 A jel-zaj és a kontraszt-zaj arány vizsgálata

A fémből és műanyagból álló vizsgálati darabokról készült XCT felvételeken gyakran tapasztalhatók műtermékek, amik nehezítik azok felhasználását és hatással lehetnek a mérések pontosságára. Ezért az XCT felvételeken megvizsgáltam a jel-zaj arányt (SNR) és a kontraszt-zaj arányt (CNR). A vizsgálat során arra voltam kíváncsi, hogy az alumínium test furatainak oldalfalának, a POM csapok oldalfalának és a levegőrésnek az SNR és CNR értékei és a mérési hiba között találkozik-e összefüggést.

Az SNR és CNR vizsgálatához a voxeltérfogatokból ki kellett vágnom azokat a térfogati részeket, amelyek a vizsgálat szempontjából érdekesek. Az egyes szegmensek 2-2 mm szélesek a POM csapokon és a dimenzionális méréseket ezeknek a szegmenseknek a középvonalában végeztem, ezért a középvonaltól szimmetrikusan felfelé és lefelé is 0,5-0,5 mm-es sávot vágtam ki 1 mm mélyen mind az alumínium test oldalfalából, mind a POM csapok palástfelületéből. Ezeket a kivágandó részeket lemodelleztem CAD szoftverben a referenciamérések eredményei alapján. A levegőrés CAD modelljeinek külső és belső átmérői megegyeznek az alumínium test és a POM csapok kivágásaihoz használt CAD modellek belső és külső átmérőivel. Az kivágáshoz használt CAD modellek a 16.ábrán láthatók. Egy voxeltérfogat kiértékeléséhez összesen 126 szegmens CAD modelljét használtam fel. A szűrkeségi értékek kiértékelésére írt automatikus

kiértékelőprogram futtatása voxeltérfogatonként nagyjából 5 órát vett igénybe. Ebből is látszik a CT technológia nagy számítási igénye.

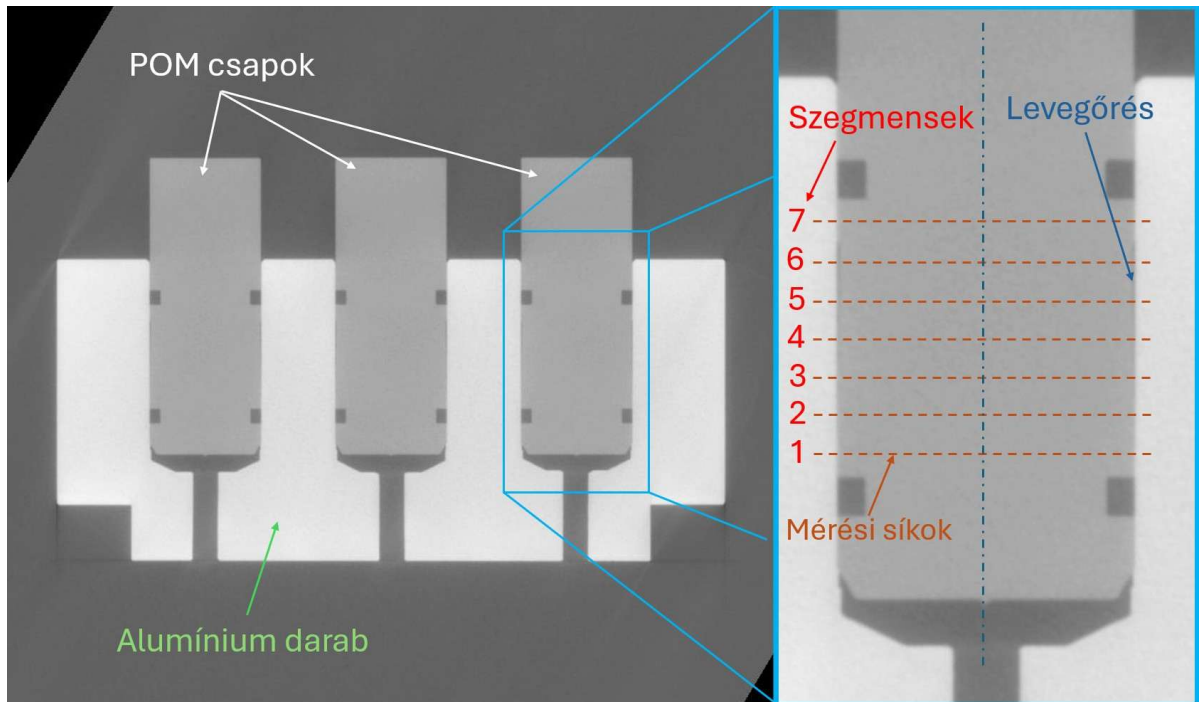


16. ábra: A térfogati kivágáshoz használt gyűrű alakú modellek különböző színekkel jelölve a bal oldali képen, a kivágásokhoz használt CAD modellek metszeti képe a jobb oldalon látható a voxeltérfogaton

A voxeltérfogatból történő kivágások során a CAD modellek által behatárolt voxeleket különítettem el a teljes térfogatból, ami lehetővé tette a kivágott térrészben található voxelek szürkeségi értékeinek vizsgálatát. A szürkeségi értékekből kiszámoltam az átlagos szürkeségi értéket és a szórást. A térrészek kivágását és a számításokat a VGStudio 2025.2 szoftverben csináltam.

5.5 A dimenzionális mérések eredményei

Mind a nyolc XCT paraméterbeállítás esetében hat furatban és hat csapon – három 15 mm átmérőjűn és három 20 mm átmérőjűn – végeztem a méréseket hét különböző mélységben. Ez összesen $8 \times 6 \times 7 = 336$ átmérőmérést jelent a furatokra és ugyanennyit a csapokra. Ezeket a méréseket elvégeztem XCT-vel SM és MM esetben készített térfogati képeken is, így a furatok esetében $336 \times 2 = 672$ és ugyanennyi átmérőeredmény keletkezett a POM csapok esetében is. A 17. ábra a 4-es beállítással készült voxeltérfogati kép metszetét mutatja, amin látható az alumínium darab és a benne lévő POM csapok.



17. ábra: A 4-es beállítással, MM esetben készült voxeltérfigat metszetét mutatja, jelölve a mérési síkok elhelyezkedését, a levegőrést és a szezmenseket

Az összes átmérőértékhez tartozik egy referenciaérték, amit a CMM-mel mértem meg, hogy az XCT rendszer mérési hibáját ki tudjam számolni az összes esetben.

A nyolc paraméterbeállítás alatt négy különböző ablakszélességet alkalmaztam, ami közvetlen kapcsolatban áll a térfogati kép voxelméretével. A négyféle voxelméret a 6. táblázatban látható.

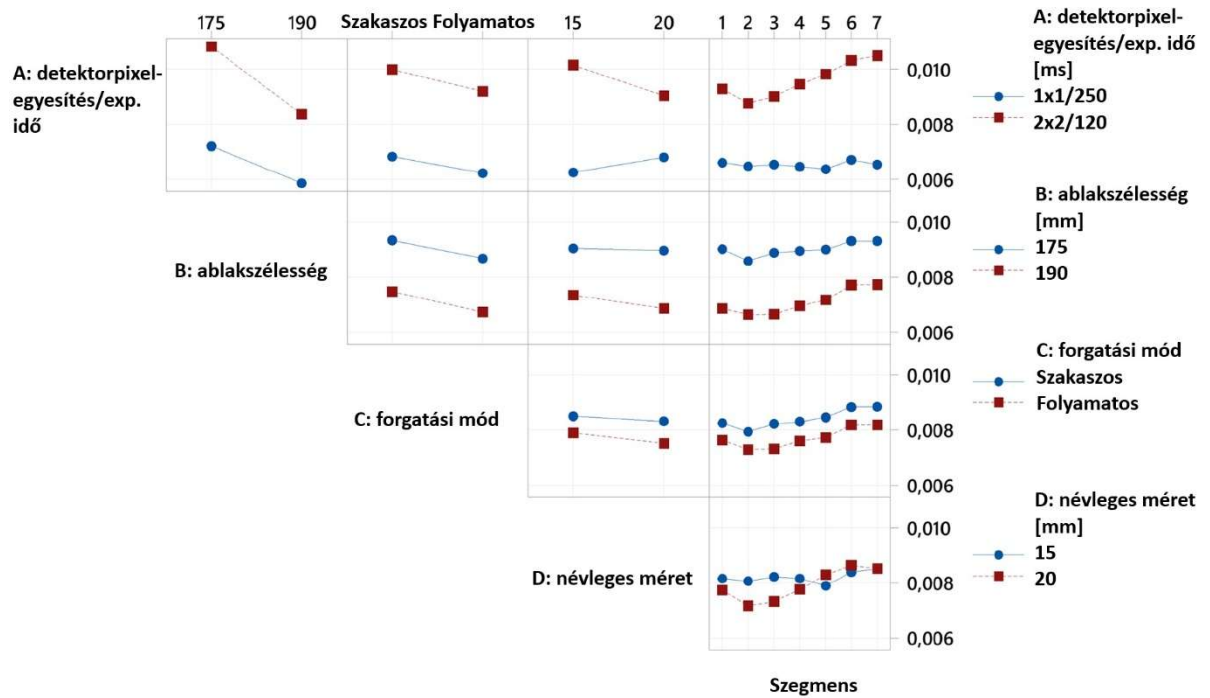
6. táblázat: Az egyes beállításokhoz tartozó voxelméret

A: detektorpixel-egyesítés/ expozíciós idő [ms]	B: ablakszélesség [mm]	Voxelméret [μm]
1x1/250	175	68,4
1x1/250	190	74,3
2x2/120	175	136,8
2x2/120	190	148,5

5.5.1 Az alumínium furatok mérési hibája

Az egyanyagú (SM) mérések (ld. 15. ábra) során megmértem a $D_{Al,SM,i}$ ($i = 1, \dots, 7$) átmérőket. A mérések alapján kiszámoltam a mérési hibákat. A mérési hibák kölcsönhatásábrája a 18. ábrán látható, ami az alumínium furatok SM módú mérési hibák átlagos értékeit mutatja különféle csoportosítások szerint. A kölcsönhatásábra több különböző diagramból áll, amelyek mindegyike egy adott szkennelési paraméternek felel meg. Mindegyik diagram két különálló görbét jelenít meg,

amik a megfelelő szkennelési paraméter szintjeit mutatják. A diagram minden pontját a kapcsolódó szkennelési paraméterek átlagaként számítottam ki.



18. ábra: A mérési hibák (ME) kölcsönhatásábrája SM esetben az alumínium testet mérve

A pixelegyesítés és az expozíciós idő két szintjének összehasonlítása azt mutatja, hogy az 1x1-es pixelegyesítés 250 ms-os expozíciós idővel minden esetben alacsonyabb mérési hibát eredményez, mint a 2x2, 120 ms-os beállítás. Ez arra utal, hogy a nagyobb felbontás növeli a mérés pontosságát. Hasonlóképpen, az ablakszélesség hatása azt mutatja, hogy bár mind a 175 mm-es, mind a 190 mm-es ablakszélesség hasonló tendenciát követ, a 175 mm-es (nagyobb geometriai nagyítás) beállítás kismértékben csökkenti a mérési hibákat. A különbség azonban minimális, ami azt jelzi, hogy az ablakszélesség csak csekély hatással van a pontosságra. Ezzel szemben a forgatási mód jelentősebb szerepet játszik, mivel a szakaszos forgatás valamivel nagyobb mérési hibát eredményez a folyamatos forgatási módhoz képest. A szakaszos forgatási módban a vizsgálati darab vagy a tartó hajlamosabb elmozdulni, ami rontja a felvétel pontosságát.

A furat névleges méretének elemzése azt mutatja, hogy a relatív mérési hibák (a mérési hibát az átmérő értékével osztva) magasabbak a 20 mm-es furat esetében, mint a 15 mm-esnél, annak ellenére, hogy az abszolút mérési hibák nem különböznek jelentősen.

A kölcsönhatásábra azt is feltárja, hogy nincsenek jelentős különbségek az átlagos mérési hibák között, ha azokat a szegmensek szerint kategorizáljuk. Bár kisebb eltérések megfigyelhetők, az

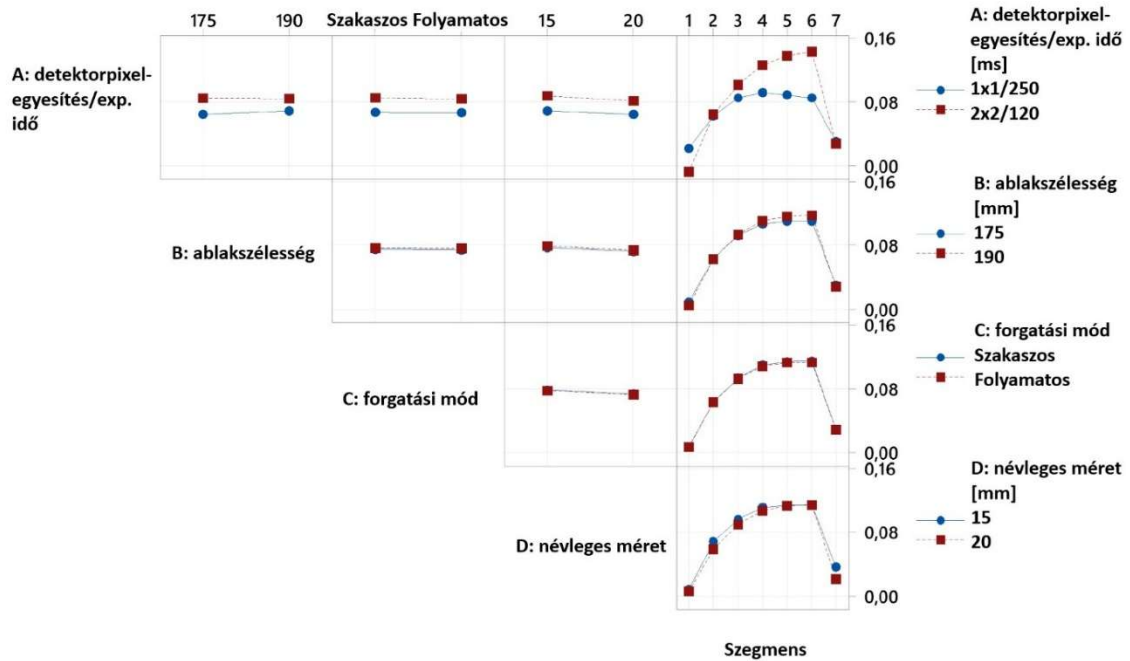
általános tendencia viszonylag stabil marad a különböző szegmensekben, ami arra utal, hogy a szegmens pozíciója nincs jelentős hatással a mérés pontosságára.

Az alumínium darab SM esetben elemzett furatátmérőinek a statisztikai jellemzőit mutatja a 7. táblázat. Az adatok különböző voxelméreteknél (68,4 μm , 74,3 μm , 136,8 μm és 148,5 μm) és névleges furatméreteknél (15 mm és 20 mm) végzett méréseket tartalmaznak. A voxelméret és névleges méret minden kombinációjára a megfigyelések száma ($N = 42$) állandó. Az átlagos mérési hibák azt jelzik, hogy a kisebb voxelméretek (68,4 μm és 74,3 μm) általában alacsonyabb hibaértékeket eredményeznek, 0,0056 mm és 0,0075 mm közötti átlagokkal. Ezzel szemben a nagyobb voxelméretek (136,8 μm és 148,5 μm) magasabb átlagos mérési hibát mutatnak, amelyek elérik a 0,0112 mm-t is. A mediánértékek szorosan illeszkednek az átlagokhoz, ami az adatok viszonylag szimmetrikus eloszlására utal. A szórás a körülményektől függően változik: a kisebb voxelméretek alacsonyabb varianciát mutatnak (körülbelül 0,0017 mm-től 0,0019 mm-ig), míg a nagyobb voxelméreteknél a szórás eléri a 0,0032 mm-t is.

7. táblázat: Az alumínium darab mérési eredményeinek a statisztikai jellemzői SM esetben

Voxelméret [μm]	Névleges méret [mm]	N	Átlag [mm]	Medián [mm]	Szórás [mm]
68,4	15	42	0,0069	0,0070	0,0018
	20	42	0,0075	0,0078	0,0017
74,3	15	42	0,0056	0,0056	0,0018
	20	42	0,0061	0,0067	0,0019
136,8	15	42	0,0112	0,0111	0,0023
	20	42	0,0104	0,0114	0,0027
148,5	15	42	0,0091	0,0090	0,0027
	20	42	0,0076	0,0086	0,0032

Az alumínium test furatainak átlagos mérési hibaértékei több anyagú (MM) esetben, különböző faktorok szerint csoportosítva, a 19. ábrán láthatók. Az adatok eltérést mutatnak az A tényező két szintje között a furatok névleges átmérőjéhez viszonyítva. Jelentős hatás fedezhető fel az A tényező szegmensek szerinti csoportosításánál. A mérési hiba jelentősen nő az 1-es szegmenstől a 6-os szegmensig, és a 7-es szegmens hasonló mérési hibát mutat, mint az 1-es szegmens.



19. ábra: A mérési hibák (ME) kölcsönhatásábrája MM esetben az alumínium testet mérve

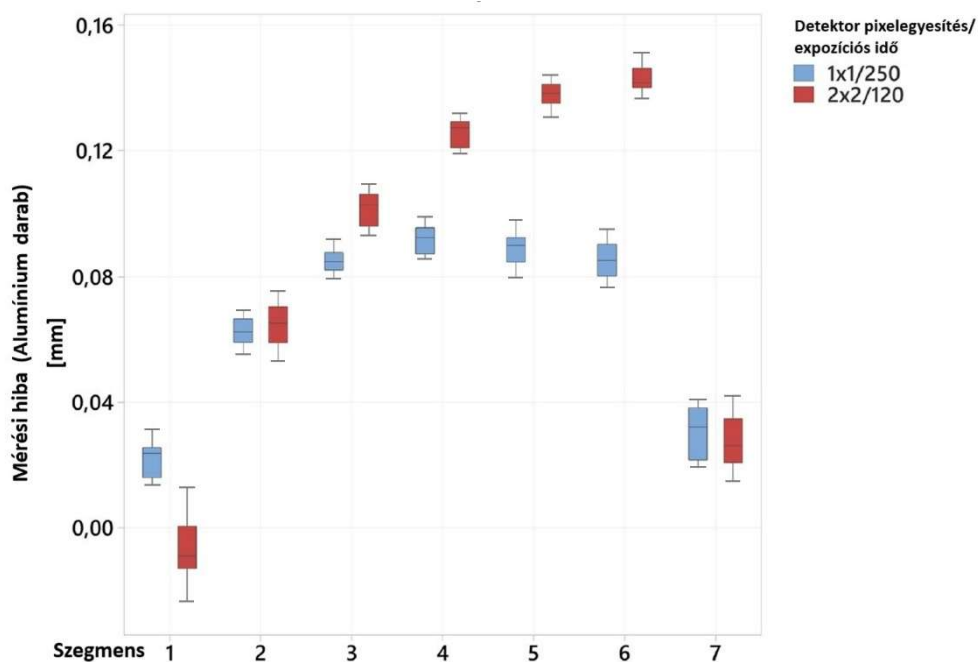
Az alumínium darab furatátmérőinek az MM esetben mért mérési hibáinak (ME) statisztikai eredményei a 5. mellékletben láthatók. A mellékelt táblázatban a pixelösszevonás és expozíciós idő, a névleges átmérő és a szegmens száma szerint csoportosított eredmények láthatók. A táblázat tartalmazza még a mintaszámot, az átlagot, a mediánt és a szórást minden egyes szegmensre és kísérleti paraméterre vonatkozóan.

Az 1x1/250 pixelösszevonás és expozíciós idő és a 15 mm-es névleges átmérő esetében a mérési hibák észrevehetően növekednek 1-től a 4-es szegmensig. A közepes hiba 0,0265 mm az 1-es szegmens esetében, ami fokozatosan emelkedik a 4-es szegmensig, elérve a 0,0919 mm-t, majd enyhén csökken a 6-os szegmensig 0,0837 mm-ig. A 7-es szegmens a mérési hiba jelentős csökkenését mutatja, 0,0378 mm középértékkel, ami az 1-es szegmenséhez hasonló. Hasonló tendencia figyelhető meg a 20 mm-es névleges méretnél is, ahol a közepes hiba 0,0179 mm-ről indul az 1-es szegmensben, 0,0919 mm-re nő a 4-es szegmensben, majd 0,0864 mm-re csökken a 6-os szegmensben. A 7-es szegmens ismét a mérési hiba jelentős csökkenését mutatja, elérve a 0,0234 mm-es középértéket.

A 2x2/250 pixelösszevonás és expozíciós idő esetén a mérési hibák általában magasabbak az 1x1/250-es beállításhoz képest. A 15 mm-es névleges furatméretnél a közepes hiba -0,0091 mm az 1-es szegmens esetében, ami a 6-os szegmensig folyamatosan növekszik 0,1438 mm-ig. A 7-es szegmens mérési hibája ebben az esetben is az 1-es szegmenshez hasonló alacsony értéket

mutat (0,0354 mm). Hasonló mintázat látható a 20 mm-es névleges méretű furatoknál is, ahol a közepes mérési hiba -0,0055 mm az 1-es szegmensnél és 0,1418 mm-re nő a 6-os szegmensig, majd a 7-es szegmensnél lecsökken 0,0202 mm-re.

Minden körülményt figyelembe véve a mérési hibák legnagyobb eltérései az 1-es és a 6-os szegmens között figyelhetők meg, míg a 7-es szegmens az 1-es szegmenshez hasonló mérési hibákat mutat. Az eredmények azt jelzik, hogy a szegmens pozíciója jelentős szerepet játszik a mérési pontosság meghatározásában, a hibaértékek általában a szegmens pozíciójával emelkednek, és a végső szegmensnél csökkennek. A 2-től 6-ig terjedő szegmensekben a növekvő légrések valószínűleg hozzájárulnak a mérési hiba változásához.



20. ábra: Az alumínium test mérési hibái a pixelegyesítés/expozíciós idő és a szegmens szerint csoportosítva

Az 1-es és a 7-es szegmensek mérési hibája között enyhe különbséget lehet látni (20. ábra). A légrés mérete névlegesen nulla mindkét szegmensnél. A mérési hibák különbségére vonatkozó konfidencia intervallum 95%-os valószínűséggel 0,016 mm és 0,027 mm közé esik az összes adat esetében. Ez arra utal, hogy átlagosan a 7-es szegmens mérési hibája kissé nagyobb, mint az 1-es szegmensé, a különbség pedig ezen a megadott tartományon belül van. A 7-es szegmens az alumínium furat felső részéhez közel helyezkedik el, ahol kevesebb a környező anyagmennyiség az 1-es szegmenshez képest. Ez az anyageloszlásbeli különbség befolyásolhatja a mérési pontosságot, mivel a 7-es szegmens körüli kevesebb alumínium mennyiség hatással lehet a helyi képalkotási körülményekre a CT vizsgálat során.

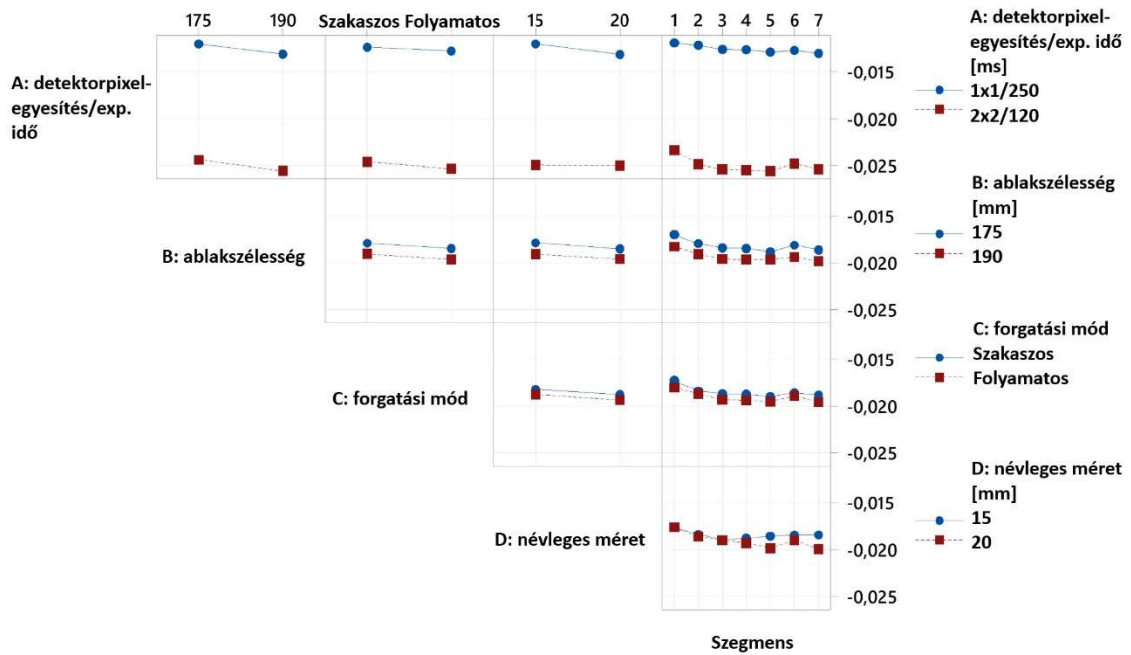
Jelentős különbség figyelhető meg a az 1-es szegmenstől a 6-os szegmensig a mérési hibaértékekben. Ennek a változásnak az oka az alumínium test és a POM csapok közötti levegőréteg szélessége lehet. Az anyageloszlásbeli különbség és a szegmensek között változó légrévméretek befolyásolhatják a helyi képalkotási körülményeket és hozzájárulhatnak a megfigyelt mérési eltérésekhez.

5.5.2 A POM csapok mérési hibája

A kölcsönhatásábra (21. ábra) a POM csapok átlagos mérési hibáit szemlélteti egyanyagú (SM) esetben. A kölcsönhatásábra a pixelösszevonás és expozíciós idő, az ablakszélesség, a forgatási mód, a névleges átmérőértékek és a szegmensek hatásait szemlélteti. A pixelösszevonás és az expozíciós idő két szintje hatással van a mérési hibára, az 1x1/250 ms-os beállítás alacsonyabb mérési hibákat okoz, mint a 2x2/120 ms-os. Ez az alumínium test mérési eredményeihez hasonlóan azt mutatja, hogy a nagyobb felbontás (kisebb voxelméret) kisebb mérési hibát eredményez. Az ablakszélesség két szintjének hatása a mérési hibára elhanyagolható. A kölcsönhatásábra azt mutatja, hogy az átlagos mérési hibák a különböző szegmensek között közel állandóak és a szegmensek pozíciója nem befolyásolja a mérések pontosságát.

A 8. táblázat a POM csapok SM esetben mért átmérők mérési hibáját a voxelméretek és a névleges átmérők szerint csoportosítva és átlagolva mutatja be. A mérési hibák minden esetben negatívak, ami a csapok átmérőjének szisztematikus alulbecslésére utal. Egyértelmű tendencia figyelhető meg a voxelméret és a mérési hiba között. Finomabb voxelfelbontásoknál (68,4 μm és 74,3 μm) az átlagos mérési hibák -0,0115 mm és -0,0137 mm között mozognak.

Ahogy a voxelméret 136,8 μm -re és 148,5 μm -re nő, a mérési hiba nagysága körülbelül megduplázódik, és -0,0242 mm és -0,0257 mm közötti értékeket ér el. A hiba növekedése a voxelméret növekedésével együtt arra utal, hogy a durvább felbontások csökkentik a mérés pontosságát. A szórás értékei is hasonlóképpen megnőnek a voxelmérettel együtt. A kisebb voxelméretek alacsonyabb változékonyságot mutatnak, 0,00076 mm alatti szórásértékekkel. Ezzel szemben a nagyobb voxelméretek (136,8 μm és 148,5 μm) nagyobb változékonyságot mutatnak, akár 0,00133 mm-t is elérő szórásértékekkel. Ez arra utal, hogy a finomabb voxelméretek nemcsak pontosabb méréseket tesznek lehetővé, hanem javítják a mérés precizitását is. A két névleges csapátmérőt (15 mm és 20 mm) összehasonlítva a mérési hibák kissé magasabbak a nagyobb csapátmérő esetén, különösen a nagyobb voxelméreteknél. Ez arra utal, hogy a mérési hibákat befolyásoló domináns tényező a voxelméret.



21. ábra: A mérési hibák (ME) kölcsönhatásábrája SM esetben a POM csapok esetében

8. táblázat: A POM csapok mérési hibájának átlaga, mediánja és szórása a névleges átmérő és a voxelméret szerint csoportosítva

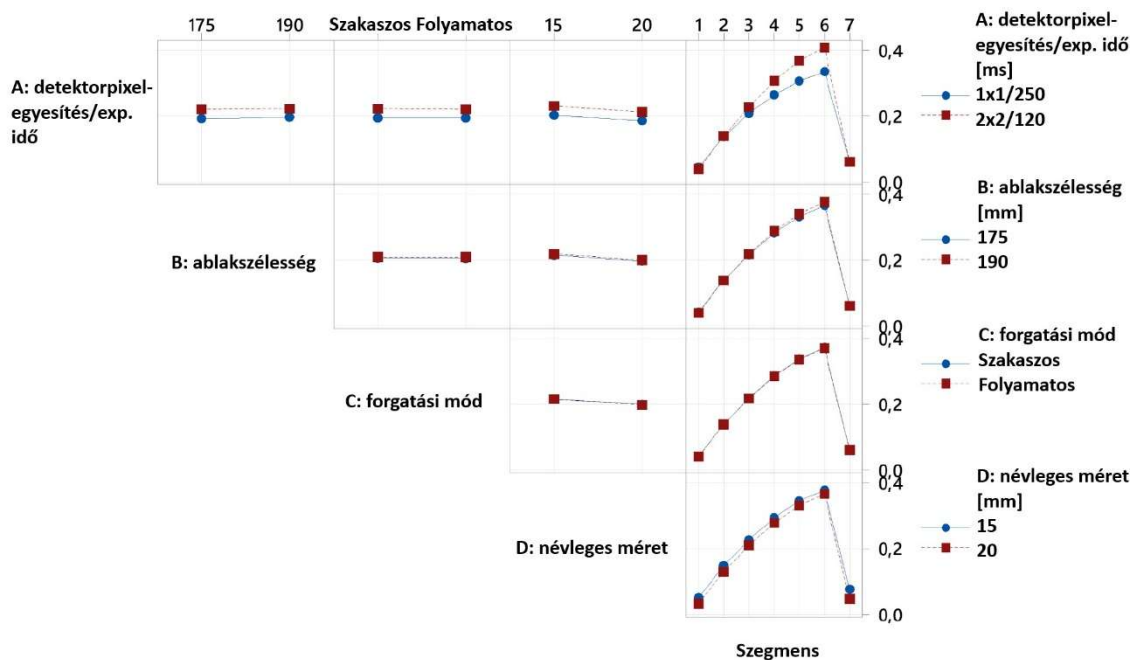
Voxelméret [μm]	Névleges méret [mm]	N	Átlag [mm]	Medián [mm]	Szórás [mm]
68,4	15	42	-0,0115	-0,0115	0,00072
	20	42	-0,0126	-0,0124	0,00074
74,3	15	42	-0,0125	-0,0125	0,00065
	20	42	-0,0137	-0,0137	0,00076
136,8	15	42	-0,0242	-0,0243	0,00098
	20	42	-0,0246	-0,0248	0,00131
148,5	15	42	-0,0257	-0,0255	0,00099
	20	42	-0,0255	-0,0255	0,00133

A 22. ábrán a POM csapok kölcsönhatásábrája látható MM szkennelési esetben. A mérési hiba értéke növekszik a 6-os szegegensig, majd a 7-es szegegensnél az 1-es szegegenshez hasonló értékre esik vissza. A 2x2/120 ms-os beállítás magasabb mérési hibaértéket mutat, mint az 1x1/250 ms beállítás, ami azt mutatja, hogy a felbontásnak hatása van a mérési pontosságra. A csapok névleges mérete is befolyásolja a mérési hibát. A névleges átmérőérték két szintje eltérő mintázatot mutat. Az ablakszélességnek minimális hatása van, amit az ablakszélesség két szintjéhez tartozó két görbe szoros illeszkedése jelez.

A 6. melléklet a POM csapoknál megfigyelt mérési hibákat mutatja be MM esetben, a pixelegyesítés és expozíciós idő (1x1/250 ms és 2x2/120 ms) és a névleges furatméretek (15 mm

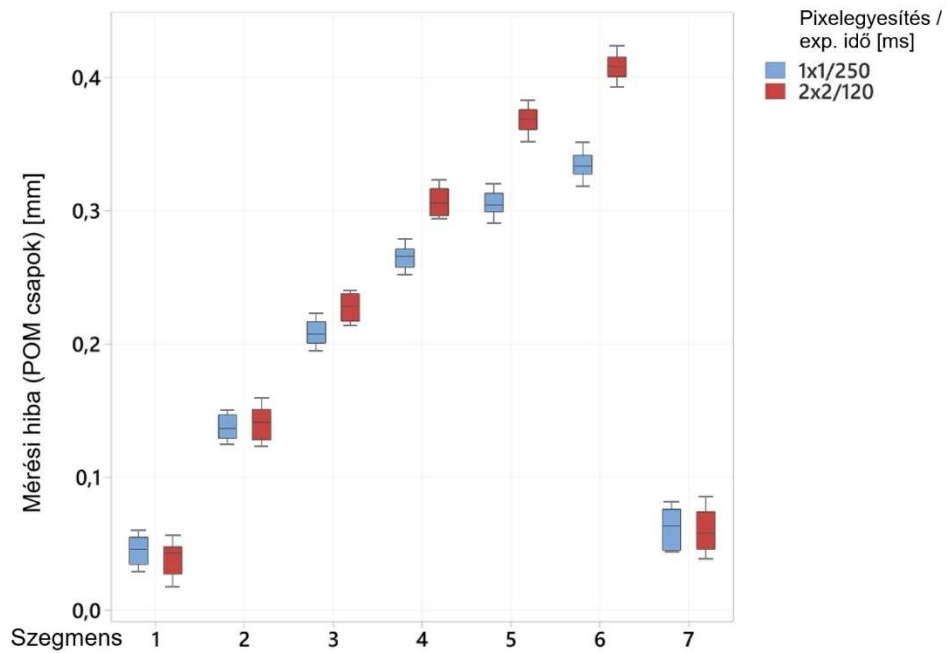
és 20 mm) szerint kategorizálva. Az adatok egyértelmű tendenciát mutatnak a mérési hibákban csapok hossza mentén, az eltérések általában az 5. vagy 6. szegmensig növekednek, mielőtt a 7. szegmensnél csökkennének. Ez a minta minden paraméterbeállításnál következetes, ami a mérési pontosság szisztematikus változásaira utal a csapok mentén.

Az 1x1/250 ms-os és a 2x2/120 ms-os beállításokat összehasonlítva egyértelmű a különbség. A 2x2/120 ms-os beállítás minden beállítás esetében magasabb átlagos mérési hibát mutat 0,4142 mm-es (6-os szegmens, 15 mm-es névleges átmérő) és 0,4018 mm-es (6-os szegmens, 20 mm-es névleges átmérő) csúcstértekkel. Ezzel szemben az 1x1/250 ms-os beállítás alacsonyabb eltéréseket mutat, a legnagyobb mérési hiba a 6-os szegmensnél és 15 mm-es névleges átmérőnél jelentkezik (0,3408 mm). A 20 mm-es névleges átmérőjű csapoknál a maximális mérési hiba a 6-os szegmensnél jelentkezett, 0,3285 mm-el. Ez azt mutatja hogy a pixeleyesítésnek nagy hatása van a csökkenő felbontás miatt a mérési hibákra.



22. ábra: A mérési hibák (ME) kölcsönhatásábrája MM esetben a POM csapok esetében

A szórás a mérés stabilitását átfogóan képes jellemzni. A POM csapok MM mérése során alacsony szórást tapasztaltam a mérési hibák értékeinél. A legmagasabb szórásérték a 6-os szegmensnél jelentkezett a 2x2/120 ms-os beállításnál 0,0072 mm-es értékkel, a 20 mm-es névleges átmérőjű csapoknál. A szórásértékekben enyhe emelkedést tapasztaltam a szegmensszám emelkedésével és a pixeleyesítés bekapcsolásával (2x2/120 beállítás).



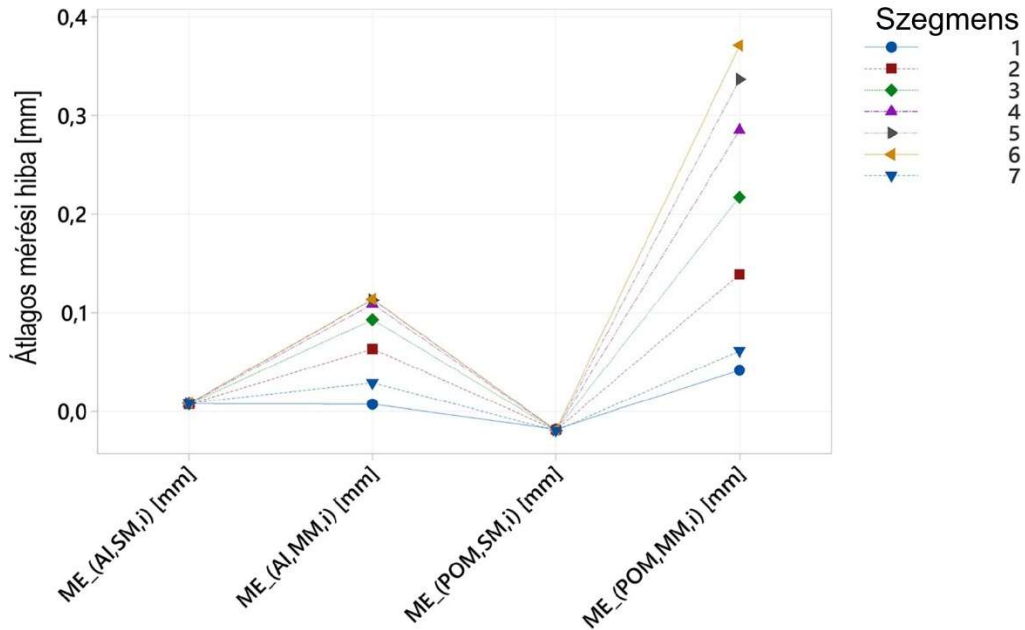
23. ábra: A POM csapok mérési hibái a pixelegyesítés és expozíciós idő két szintje szerint csoportosítva

Az 1-es és a 7-es szegmensek mérési hibái között enyhe eltérést tapasztaltam (23. ábra). Az 1-es szegmenstől a 6-os szegmensig a mérési hiba fokozatosan növekszik. Ennek a növekedésnek a mértéke a pixelegyesítés és expozíciós idő két szintjétől függ. A mérési hiba növekedését valószínűleg a POM csapok és az alumínium furatok közötti növekvő szélességű levegőrészek okozzák.

5.5.3 A mérési hibák összehasonlítása és statisztikai elemzése egyanyagú és többanyagú mérések esetében

Az alumínium test furatainak átmérőinél a legkisebb mérési hiba körülbelül 6 μm volt egyanyagú szkennelési (SM) esetben. A POM csapok esetében ezek a mérési hibák 11 μm körül alakultak SM szkennelésnél és 50 μm körül többanyagú szkennelésnél (MM). Ezek az értékek azt jelzik, hogy a különböző anyagok együttes jelenléte hogyan befolyásolja az XCT mérések pontosságát. A vonaldiagram (24. ábra) az átlagos mérési hibák (ME) szisztematikus változását mutatja az alumínium és a POM esetében, a szegmensek szerint különböző színekkel jelölve. Az X tengelyen az anyagok és a szkennelési módok szerinti csoportosítás látható, míg az Y tengely a mérési hiba értékét mutatja. Mind az $ME_{AL,SM,i}$, mind pedig az $ME_{POM,SM,i}$ esetében állandóak maradnak a mérési hibák az összes szegmens mérésénél. Ezzel szemben az $ME_{AL,MM,i}$ és az $ME_{POM,MM,i}$ szegmenstől függő trendeket mutatnak. Az alumínium furatátmérők esetében a legnagyobb átlagos mérési hiba körülbelül 0,1 mm, míg a POM csapok átmérőinél eléri a közel 0,4 mm-t. Ahogy

a 24. ábrán is látható, a POM csapok átmérőinek a mérési hibái jelentősen magasabbak, mint az alumínium test furataiban mértéké az összes szegmens esetében. Ez annak tudható be, hogy az alumínium test furatai esetében a mérést alacsonyabb sűrűségű POM anyag befolyásolja, ami viszonylag alacsony mérési hibát eredményez. Ezzel szemben a POM csapok átmérőjét az alumínium test nagyobb sűrűsége és jelentősen nagyobb elnyelődési tényezője befolyásolja és okoz nagyobb mérési hibákat.



24. ábra: A mérési hibák az anyagok, a szkennelési mód és a szegmensek szerint csoportosítva

Négy faktor szerinti szórásanalízist (ANOVA, [210]) használtam kétszeres kölcsönhatás figyelembevételével a mérési eredmények kiértékelésére. A mérési modell, amely rögzített faktorokat tartalmaz, a következő:

$$y_{ijklm} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + AB_{ij} + AC_{ik} + AD_{il} + BC_{jk} + BD_{jl} + CD_{kl} + \epsilon_{ijklm} \quad (27)$$

ahol y_{ijklm} a mért érték (ME), μ a várható érték, ϵ_{ijklm} az ismétlésből származó hiba. A faktorok a szintekkel együtt a következők:

- A: pixelegyesítés és expozíciós idő [ms] – 2x2/120; 1x1/250 ($i = 1, 2$)
- B: ablakszélesség [mm] – 175; 190 ($j = 1, 2$)
- C: forgatási mód – folyamatos; szakaszos ($k = 1, 2$)
- D: névleges átmérő – 15 mm; 20 mm ($l = 1, 2$)
- $m = 1, 2, 3$ az ismétlések a furatok és csapok esetében

Az $ME_{Al,SM,i}$, $ME_{Al,MM,i}$, $ME_{POM,SM,i}$, és $ME_{POM,MM,i}$ válaszokat minden szegmensre külön számoltam ki ($i = 1, \dots, 7$). Az ANOVA analízis eredményeként 5%-os megbízhatósági szinten azonosítottam a szignifikáns faktorokat (9. táblázat) és kiszámítottam a reziduális szórást (10. táblázat), amely az ismétléses szórásnak a becslése. A reziduumok (a mért értékből levonva a becsült értéket kapjuk a reziduumot) véletlenszerű eloszlásúak és a csoportokon belüli varianciák azonosak voltak, ami megerősítette, hogy az ANOVA feltételei teljesültek.

9. táblázat: ANOVA táblázat a szignifikáns faktorokról

i	1	2	3	4	5	6	7
$ME_{Al,SM,i}$	A, B	A, B	A, B	A, B	A, B	A, B	A, B
$ME_{Al,MM,i}$	A, B, AD A, B, C, AC,	D, AD	A, D, AB, AD	A, B, C, D, AB, AD	A, D, AB, AD A, B, C, D,	A, B, AB, AD	A, D A, B, C,
$ME_{POM,SM,i}$	AD	A, B, AD	A, B, C, AD	A, B, C, D	AD	A, B, D	D
$ME_{POM,MM,i}$	A, B, D	D	A, B, D	A, B, D, AD	A, B, D	A, B, C, D	D

SM esetben az alumínium furatok ANOVA eredményei azt mutatják, hogy a pixelegyesítés és expozíciós idő (A) és az ablakszélesség (B) szignifikáns faktorok, amelyek befolyásolják a mérési hibát. Ez a két paraméter hatással van a képfelbontásra és a rekonstruált térfogati kép minőségére, ami közvetlenül befolyásolja az átmérőmérések pontosságát. Más faktorok, mint például a forgatási mód vagy a névleges átmérő nem mutattak szignifikáns hatást. A reziduumok (körülbelül 2-3 μm) alacsonyak és egyenletesek voltak minden szegmensnél, ami megerősíti, hogy az alumínium test mérési folyamata SM szkennelésnél stabil és megbízható.

Az alumínium test MM mérési eredményei azt mutatják, hogy a mérési hibát a szkennelési paraméterek szélesebb köre befolyásolja az SM esethez képest. A pixelegyesítés együtt az expozíciós idővel (A) és az ablak szélessége (B) mellett a névleges átmérő (D) faktor és az A×D, valamint A×B-hez hasonló kölcsönhatások is szignifikánsak voltak több szegmens esetében is. A POM jelenléte az alumínium mellett nehezíti a képalkotást, ami a méréseket érzékenyebbé teszi a szkennelési beállítások változásaira. A maradék hibák magasabbak voltak, mint az SM esetben, 0,00207 mm és 0,00760 mm között mozogtak és néhány szegmensben a hiba majdnem háromszor nagyobb volt.

10. táblázat: A reziduális szórások (ismételhetőség) milliméterben

i	1	2	3	4	5	6	7
$ME_{Al,SM,i}$	0,00259	0,00286	0,00210	0,00210	0,00262	0,00255	0,00260
$ME_{Al,MM,i}$	0,00760	0,00335	0,00207	0,00207	0,00302	0,00269	0,00376
$ME_{POM,SM,i}$	0,00077	0,00060	0,00089	0,00089	0,00042	0,00069	0,00079
$ME_{POM,MM,i}$	0,00614	0,00494	0,00328	0,00328	0,00310	0,00312	0,00554
$ME_{Al,MM,i} / ME_{Al,SM,i}$	2,9	1,2	1,2	1,0	1,2	1,1	1,4
$ME_{POM,MM,i} / ME_{POM,SM,i}$	8,0	8,2	6,2	3,7	7,4	4,6	7,0

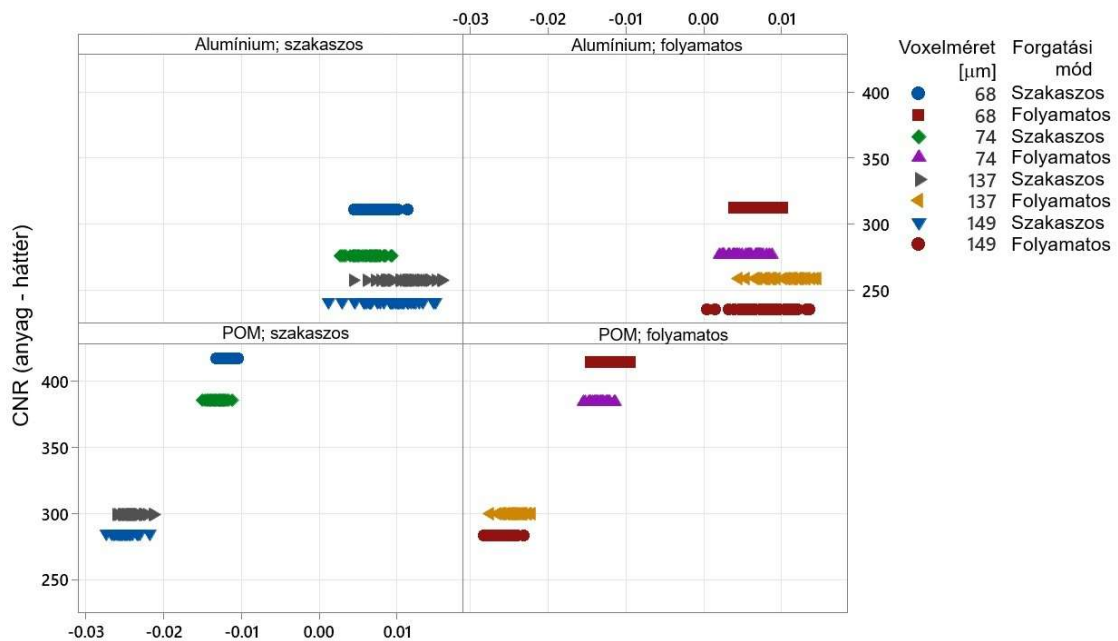
Az SM szkennelés során a POM csapok ANOVA eredményei azt mutatják, hogy a mérési hibát több szkennelési paraméter is befolyásolja. Az összes esetet tekintve az A és a B faktor volt a leginkább szignifikáns faktor. Azonban az alumínium darabbal ellentétben a forgatási mód (C) és a névleges átmérő (D) is észrevehető hatást gyakorolt több szegmensnél is. Ezenkívül néhány kétirányú kölcsönhatás, mint például a pixelegyesítés (az expozíciós idővel közösen) és a forgatás (AC), valamint a pixelegyesítés (az expozíciós idővel együtt) és a névleges átmérő (AD) is szignifikáns volt bizonyos szegmenseknél. A maradék hibák 0,00042 mm és 0,00089 mm között mozognak, ami meglehetősen alacsony. Mivel ezek a hibák sokkal alacsonyabbak, mint az alumínium test szkenneléseinél tapasztaltak, még a szkennelési beállítások kis változásai is statisztikailag szignifikánsnak bizonyultak.

Az MM esetben a POM szkenneléseknél a mérési hibát több szkennelési paraméter is befolyásolta. A legtöbb esetben a pixelegyesítés együtt az expozíciós idővel (A), az ablakszélesség (B) és a névleges átmérő (D) faktorok voltak szignifikánsak. Néhány esetben a forgatási mód (C) és az A×D kölcsönhatás is szerepet játszott. Az SM esethez képest a maradék hibák sokkal magasabbak voltak (0,00310 mm és 0,00614 mm között) és a hiba akár nyolcszor nagyobb is lehetett. Ez a növekedés főként a POM-ot körülvevő alumíniumnak köszönhető, ami felületi műtermékeket okoz a voxeltérfogatban és torzítja a méréseket.

5.6 A jel-zaj arány és a kontraszt-zaj arány vizsgálatok eredményei

Az SM mérések esetében a kiértékelés elsődleges célja az volt, hogy megállapítsam, mennyire különíthető el a vizsgált alkatrész a környezetétől, vagyis a levegőtől és a műhabetől. Ebben az esetben az XCT felvételen lényegében két közeg található: maga a mért anyag (alumínium vagy POM) és a háttér. A CNR egy olyan metrika, amely két különböző régió (esetemben az anyag és a háttér) megkülönböztethetőségét méri a zajszinthez viszonyítva. Mivel a cél a tárgy felületének minél pontosabb meghatározása, a CNR érték kiszámítása volt a leglogikusabb módszer annak értékelésére, hogy a kontraszt a tárgy és a háttér között milyen mértékű.

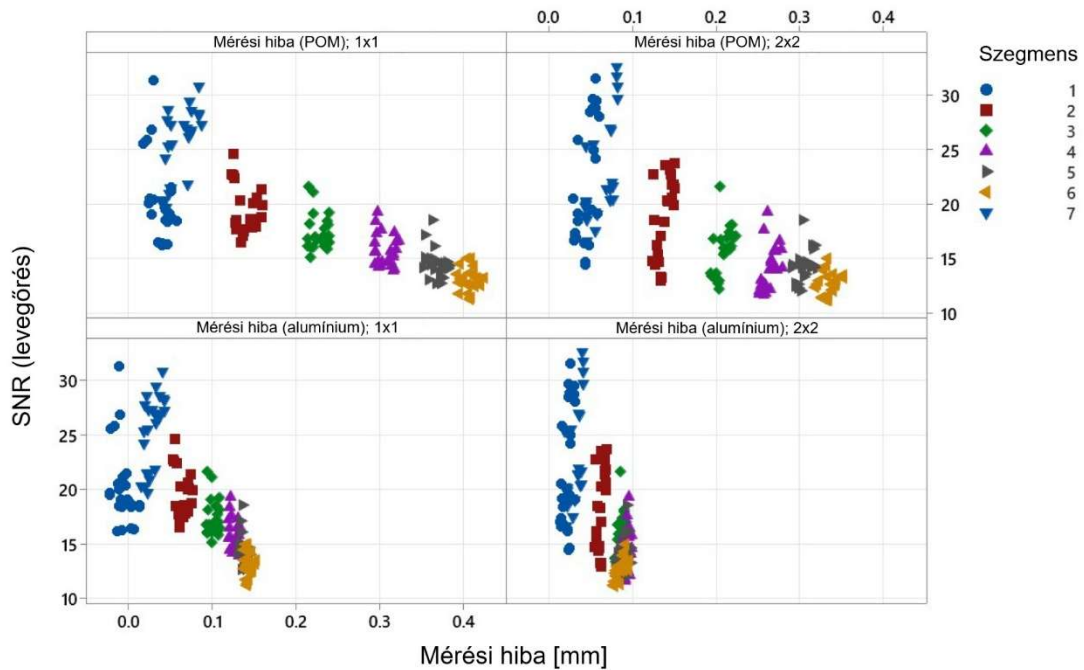
SM esetben a vizsgálati darabok teljes térfogatából vettem ki a szűrkeségi értékeket a CNR számításokhoz, mert ebben az esetben a levegőrés szűrkeségi értékei nem értelmezhetők. A CNR értékeket a háttér és az alumínium vagy a POM anyagok között számoltam ki. A háttér magában foglalja a befogásra használt műhabot és a levegőt is. Az SM esetben készült XCT felvételek CNR értékeit a 25. ábra mutatja. A kisebb voxelméretekkel készített térfogati képek magasabb CNR értékkel rendelkeznek, mint a nagyobbakkal készültek. A legnagyobb voxelméret (149 μm) esetében a forgatási mód befolyásolja az alumínium testről készült felvételen a CNR értékét. A folyamatos forgatási módban alacsonyabb CNR értéket mértem, mint a szakaszos forgatási módban. A mérési hibák értékei közel azonosak az alumínium test esetében, míg a POM csapok esetében jelentős különbség látható a mérési hiba értékeiben a voxelméret szerint.



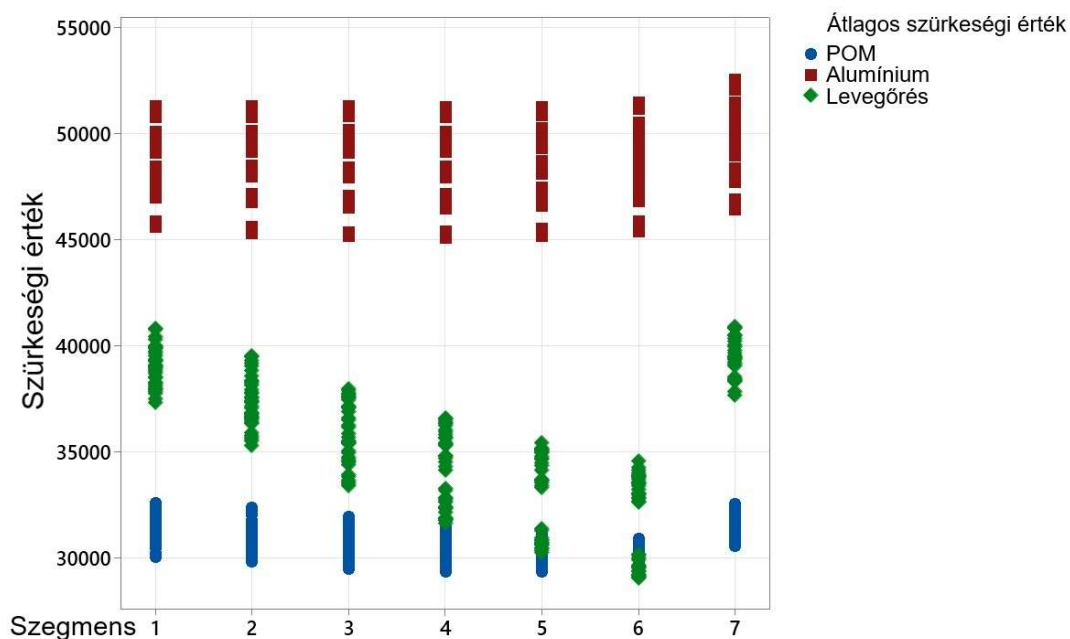
25. ábra: Az anyag (alumínium vagy POM) és a háttér (levegő) közötti CNR értékek ábrázolva a mérési hiba üggyvényében a voxelméret és a forgatási mód szerint csoportosítva

Az MM esetben készített térfogati képek vizsgálatakor a vizsgálat fókuszába az alumínium és a POM alkatrészek közötti légrés került. Itt a központi kérdés az volt, hogy a különböző szkennelési paraméterek hogyan befolyásolják a levegőrésnek a jelét és annak minőségét a felvételen. Az SNR egy adott régió belüli jel erősségét viszonyítja az ottani zajszinthez. Ebben az esetben az SNR kiszámítása a légrés területére vonatkozóan lehetővé tette annak közvetlen mérését, hogy a résből származó jel mennyire volt erős és tiszta a zajhoz képest. Ez a metrika segített megérteni, hogy az eltérő szélességű légréseket milyen megbízhatóan lehet detektálni és mérni a különböző beállítások esetében.

Az alumínium test és a POM tengelyek közötti légrés SNR értékeit kiszámítottam az összes XCT felvételen, az összes szegmens esetében. A kapott SNR értékeket a mérési hiba függvényében a 26. ábra mutatja az anyagok és a pixelegyesítés szerint csoportosítva. A pontdiagramból látható, hogy a legmagasabb SNR értékek a két légrés nélküli esetben, az 1-es és 7-es szegmensek esetében fordulnak elő. A légrés szélességének növekedésével az SNR értékek csökkennek. Az alumínium test esetében az 1x1-es pixelegyesítési beállításnál a mérési hiba a 4-es, az 5-ös és a 6-os esetben állandó. A 2x2-es pixelegyesítési beállításnál a mérési hiba monoton növekszik a légrés szélességének növekedésével az alumínium test esetében. A POM csapoknál az SNR értékek a mérési hiba függvényében szegmensenként egyértelműen elkülönülnek. A levegőrés szélességének a növekedése az SNR érték csökkenésével jár együtt.

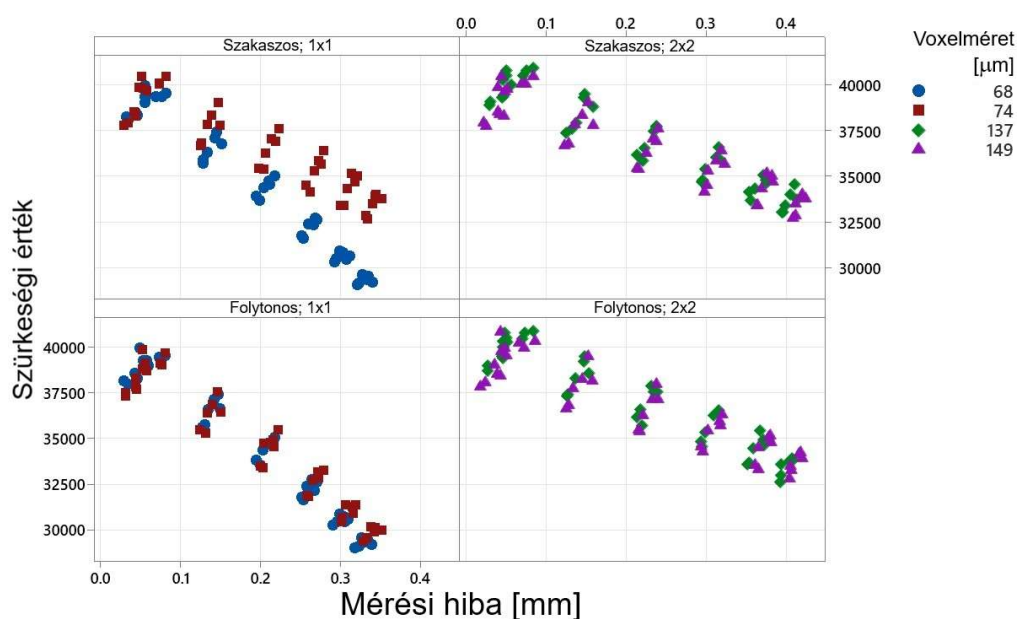


26. ábra: A levegőrés SNR értékei a mérési hiba függvényében ábrázolva és csoportosítva a szegmens, az anyag és a pixelegyesítés és expozíciós idő szerint



27. ábra: Az átlagos szürkeségi értékek a szegegmenseként az alumínium darabban, a pom csapokban és a közöttük lévő levegőrészekben

A légrések szegegmensekénti térfogataiban a szürkeségi értékek várható értéke alacsonyabb, mint a POM-é, közel a háttér értékéhez. Ezzel szemben egy esetet kivéve a szürkeségi értékek az alumínium és a POM értékei között helyezkednek el (27. ábra). A kivételt a 6-os szegegens képez, melynél van olyan szürkeségi érték, ami a legalacsonyabb POM értékénél is alacsonyabb. A légrések szürkeségi értékeiben az értékek a 4-es, 5-ös és 6-os szegegmeneknél szétválnak.



28. ábra: Az átlagos szürkeségi értékek a mérési hiba függvényében ábrázolva és csoportosítva a voxelméret, forgatási mód és a pixelegyesítés és expozíciós idő szerint

A légrések átlagos szürkeségi értékeinek csoportosítása a pixelegyesítés, voxelméret és a forgatási mód szerint lehetővé teszi az adatok szétválási okának a feltárását (28. ábra). A 2x2-es pixelegyesítési beállítás esetében a levegőrészek átlagos szürkeségi értékei nem különböznek a két forgatási mód és a voxelméret változtatásával. A levegőrészek átlagos szürkeségi értékei szakaszos forgatási módban válnak szét a voxelméret szerint. Az alacsonyabb szürkeségi értékeket a legkisebb voxelméretnél, tehát a legnagyobb vizsgált felbontásban mértem.

5.7 Következtetések

Az 5. fejezetben bemutatott kutatás fő kérdése az volt, hogy az XCT-vel történő mérések pontosságát hogyan befolyásolja, ha egy összeszerelt alkatrész két, jelentősen eltérő attenuációs tulajdonságú anyagból (alumínium és POM) épül fel. A vizsgálat célja volt továbbá, hogy feltárja a különböző szkennelési paraméterek és a komponensek közötti légrés szélességének hatását a mérési hibára.

A kísérlethez egy vizsgálati darabot terveztem, amely egy alumínium testből és abba illeszkedő, lépcsőzetes átmérőjű POM csapokból állt. A komponensek között szisztematikusan változtatott légrések voltak. A méréseket az alumínium és a POM komponenseken külön-külön és összeszerelve is elvégeztem teljes faktoriális kísérleti terv szerint változtatva a szkennelési paramétereket.

A kutatás legfontosabb megállapítása, hogy az összeszerelt vizsgálati darab (alumínium és POM komponensek) mérésének esetében a mérési pontosságot leginkább a két komponens közötti légrés mérete befolyásolja. Az eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a mérési hiba szisztematikusan növekszik a légrés szélességének növekedésével. Ez a hatás domináns volt, és a több anyag együttes jelenlétéből fakadó képi műtermékekkel együtt nagyságrendekkel nagyobb mérési hibát eredményezett, mint az egyanyagú méréseknél. Míg a szkennelési paraméterek is szignifikáns hatást gyakoroltak a pontosságra, ezek hatása másodlagos volt a légrés által okozott szisztematikus torzításhoz képest. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a több anyagból álló vizsgálati darab XCT alapú metrológiai vizsgálatoknál a mérési hibát alapvetően a légrés szélessége és az anyaghatárokon keletkező műtermékek határozzák meg.

6 SLS technológia vizsgálata XCT-vel

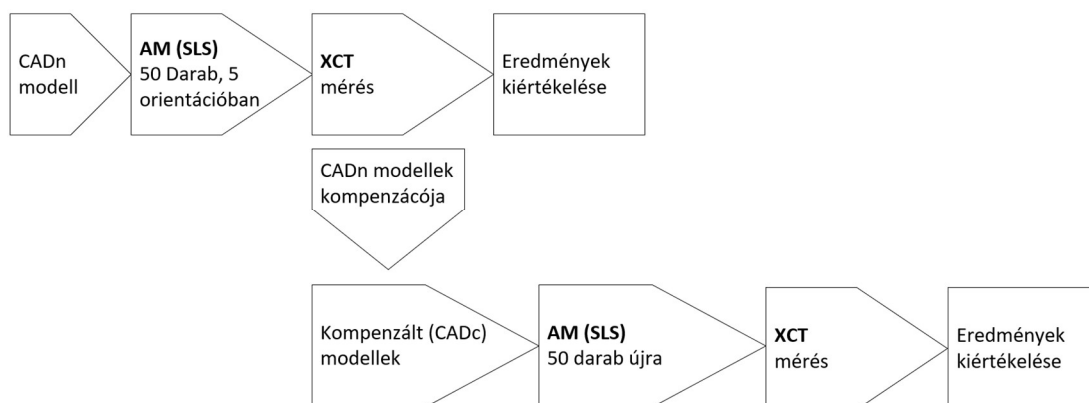
Ebben a fejezetben egy olyan kísérletsorozatot mutatok be, amelynek célja az SLS technológiával gyártott alkatrészek méretpontosságának javítása. A kutatás középpontjában egy XCT méréseken alapuló kompenzációs eljárás áll, amelynek segítségével a gyártás során keletkező, hőhatások okozta torzulásokat lehet csökkenteni. A vizsgálat során egy erre a célra tervezett próbatestet gyártottam le több különböző orientációban, majd XCT mérésekkel elemeztem a geometriai eltéréseket. Az így kapott eltérési adatok alapján kompenzált CAD modelleket hoztam létre, amelyeket újra legyártva vizsgáltam a kompenzációs módszer hatékonyságát a torzulások csökkentésében mérés technikai jellemzőkön keresztül.

6.1 A tervezés és gyártási folyamat

Az alkalmazott torzításcsökkentő eljárás hatékonyságának validálására egy iteratív, több lépésből álló kísérletsorozatot hajtottam végre. A 29. ábra mutatja az elvégzett vizsgálat folyamatát. A vizsgálat 50 darab névleges CAD (CADn) modell nyomtatásával kezdődött. A CADn modelleket 1-től 50-ig beszámoztam az egyik síkfelületen úgy, hogy a szám karakterkontúrjával egy 0,3 mm mély kihúzást csináltam, majd kivontam a felületből. A darabok egyedi megjelölésére azért volt szükség, mert a nyomtató munkatéréből kivett nagyjából 40 kg-os lazán összeállt portégla szétbontásánál nem tudtam volna beazonosítani a darabok pozícióját a nyomtatótérben. Az 50 vizsgálati darabot 5 különböző orientációban nyomtattam ki. Minden orientációban 10 vizsgálati darab volt. A nyomtatás után mind az 50 vizsgálati darabot egyesével beszkeneltem XCT rendszerrel, majd a felületmeghatározást követően lefuttattam a síklapok távolságának és a hengeres felületek pozíciójának a mérőprogramját és elvégeztem a kompenzációt a CADn modelleken. A kompenzált CAD (CADc) modelleket a nyomtatást előkészítő szoftverben visszahelyeztem ugyanabba a lokációba és orientációval, mint az első nyomtatásnál. Ezt követően a kompenzált CAD modelleket kinyomtattam és egyesével beszkeneltem az XCT rendszerrel. A felületmeghatározást követően ugyanazt a mérőprogramot futtattam le, mint a CADn-ből nyomtatott daraboknál. A CADn és a CADc modellekből származó mérési adatokat ezután kielemeztem. A következő alfejezetekben a vizsgálati folyamat egyes lépéseit részletezem.

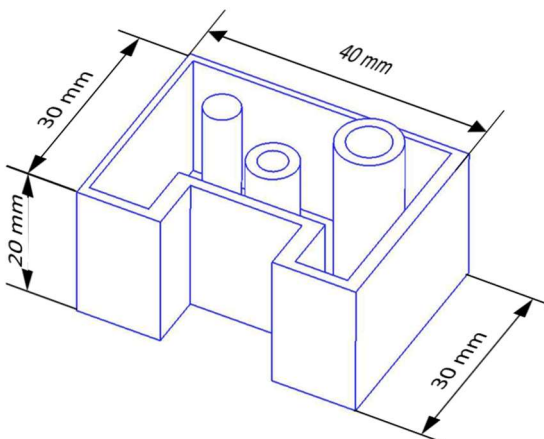
Az SLS technológiával gyártott vékonyfalú alkatrészek hajlamosak torzulni a nyomtatótérben és a hűlési szakaszban végbemenő hőtechnikai folyamatok miatt. A torzulások jellemzésére jól ismételtető, egyszerű mérés technikai jellemzőket választottam, mint a párhuzamos síkok közötti távolságok és a hengeres felületek pozíciója. A tervezett vizsgálati darab a 30. ábrán látható a

befoglaló méretekkel együtt. A vizsgálati darabon található sík és hengeres felületek. A síkok felhasználhatók sík-sík távolságok mérésére. A vizsgálati darabon található belső és külső hengeres felületeken hengerátmérőt, pozíciót és hengerességet lehet mérni. A tervezésnél figyelembe kellett venni a vizsgálatához használt XCT berendezés vizsgálati térfogatának méretét. A vizsgálatához használt GE Micromex CT berendezés szkennelési térfogatába körülbelül egy 40 mm hosszúságú alkatrész fér el.



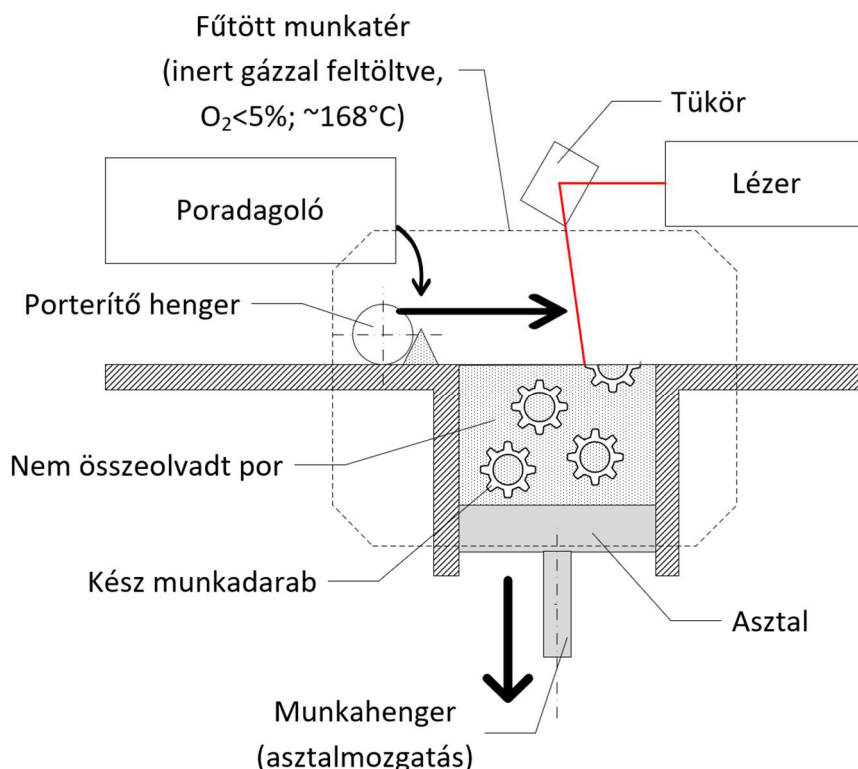
29. ábra: A torzuláscsökkentést is alkalmazó SLS technológia egyszerűsített vizsgálati folyamatábrája

A vékonyfalú alkatrészek hajlamosak torzulni az SLS technológiánál, ezért a tervezett alkatrésznek is vékonyak a falai, ráadásul a hengeres elemek egyetlen közös vékony oldalvalhoz csatlakoznak. Ami azt segíti elő, hogy a hengerek pozíciója és az oldalfalak is torzulnak a nyomtatás során.



30. ábra: Az SLS technológia vizsgálatához tervezett vizsgálati darab és annak befoglaló méretei

A 3D nyomtatáshoz egy fehér színű gyártási minőségű poliamid 12 (PA12) anyagot (DuraForm ProX PA por (3D Systems, Inc., Rock Hill, SC, USA) választottam. A PA12 por előkészítése során az előkészítő állomáson 40/60 % arányú keveréket állítottam be. Ez azt jelenti, hogy korábbi nyomtatásokból származó össze nem olvasztott por 40 %-ban került hozzáadásra friss porhoz.

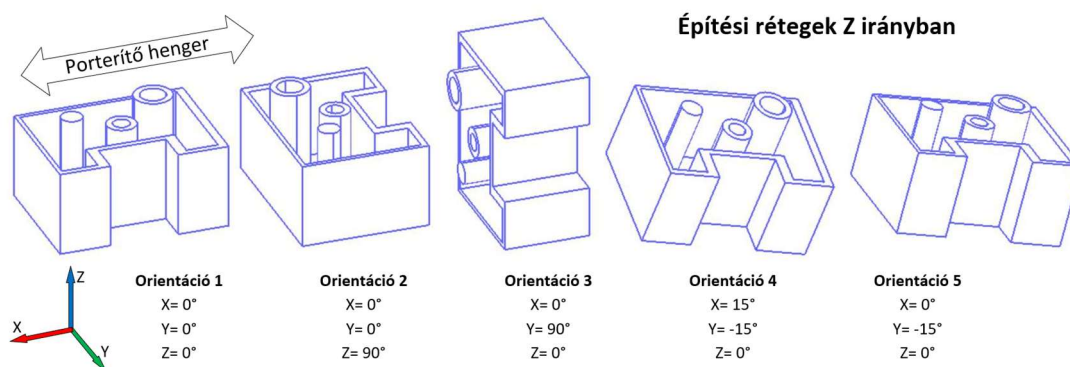


31. ábra: Az SLS nyomtató munkatérének felépítése

A nyomtatás egy ProX SLS 6100 (3D Systems, Inc., Rock Hill, SC, USA) típusú nyomtatóval történt. A nyomtató munkatérének felépítése a 31. ábrán látható. A PA12 por adagolása a poradagolóból történik a porterítő henger elé. A munkahenger az asztalt 0,1 mm-es lépésekben süllyeszti rétegenként. Az asztal süllyesztése után a port a porterítő henger egyenletesen elosztja az asztal felett. Az egyes rétegekben a munkadarabok keresztmetszetében a CAD modellek metszeti kontúrait és az általuk határolt területet egy lézer átpásztázza. A pásztázás során a PA12 por összeolvad. Azokon a területeken, amelyeken a lézer nem pásztázott a por nem olvad meg. A gyártókamra hőmérséklete $167,5^\circ C$ -ra volt beállítva, ami a PA12 por olvadási hőmérséklete alatt van $7-8^\circ C$ -al. A gyártókamra inert gázzal van feltöltve (O_2 kevesebb, mint 5%), hogy a PA12 por oxidációját elkerüljem. Miután a gyártási tétel nyomtatása befejeződik, a kötésbe nem hozott és az összeolvadt port egy egységként ki lehet venni a nyomtatóból. Az össze nem olvasztott por magától nem esik szét, de kézzel könnyen szét lehet morzsolni.

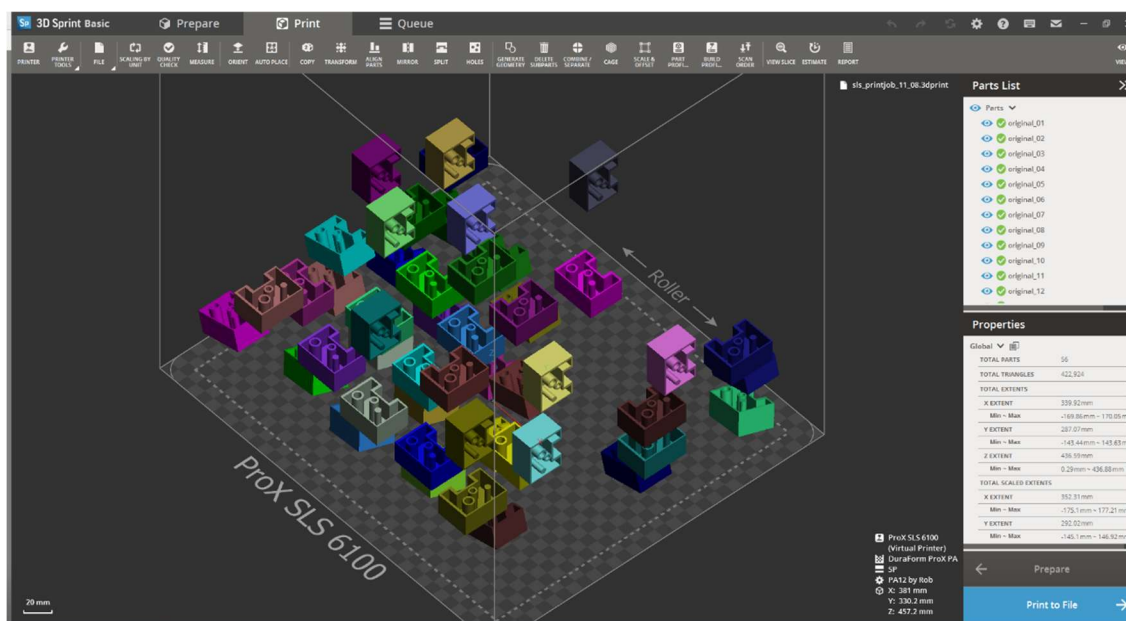
A nyomtatás 0,1 mm-es rétegvastagsággal történt. A nyomtatási projektfájl a 3D Sprint v. 3.1.0.1257 szoftverben (3D Systems, Inc., Rock Hill, SC, USA) készült az alapértelmezett beállításokkal. A beállított lézerteljesítmény 62 W volt. Az anyagtól függő skálázási tényező a munkatérben X irányban 4,233%, Y irányban 4,423% és Z irányban 2,4% volt. A teljes nyomtatási idő 11 óra és 13 perc volt, melyből 1 óra és 58 perc volt a hűtési idő. A nyomtatás után a

munkatérből kivett nem szinterezett porblokk, mely a nyomtatott alkatrészeket is tartalmazta 24 órát hűlt szobahőmérsékleten és csak ezt követően lett szétbontva. A nyomtatott vizsgálati darabok felületéről a maradék nem szinterezett por üvegyöngy-szórással lett eltávolítva. A szórás során 0,07 és 0,11 mm közötti átmérőjű üvegyöngyöket használtam 2,3 bar levegőnyomással.



32. ábra: A vizsgálati darab orientáció a munkatérben belül

Az SLS nyomtató munkatérében a vizsgálati darabokat öt különböző orientációban (32. ábra) helyeztem el. Orientációnként 10 vizsgálati darabot nyomtattam, ami összesen 50 darabot jelent. A munkatérben vizsgálati darabokat a 33. ábra szerint helyeztem el. Egy későbbi fejezetben bemutatott kompenzációval készült összes CADc modellt a nyomtatás során ugyanabba a lokációba és ugyanazzal az orientációval helyeztem el. A porblokk szétbontásakor nehéz az egyes darabok pontos beazonosítása, ezért a CADn és a CADc modelleket is számmal jelöltem 1-től 50-ig.



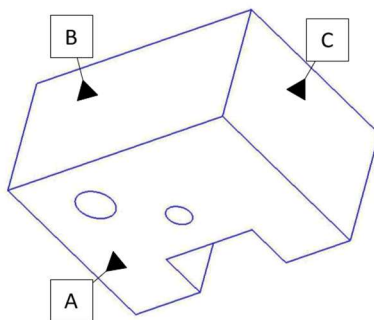
33. ábra: Az 50 db vizsgálati darab 5 különböző orientációban a munkatérben elhelyezve

6.2 Mérések

Az XCT-s szkenneléseket egy GE Micromex berendezéssel csináltam. A felvét elkészítésénél a röntgencső gyorsítófeszültségét 110 kV-ra, a csőáramot 80 μA -ra állítottam, ami így 8,8 W-os csőteltjesítményt eredményezett. A vizsgálati darab pozícióját a röntgencső és a detektor között úgy állítottam be, hogy a vizsgálati darab vetített képe a detektoron 3,141-es nagyítással jelent meg. Ezzel a beállítással a későbbi voxeltérfigaton 63,68 μm -es voxelméretet értem el. A szkennelés közben a vizsgálati darab 360°-os körbeforgatása során 720 röntgenkép készült 200 ms-os időzítéssel. A röntgenképek rekonstrukcióját a datos|x2 szoftverben csináltam. A rekonstrukció során a Scan Optimizer funkciót bekapcsoltam.

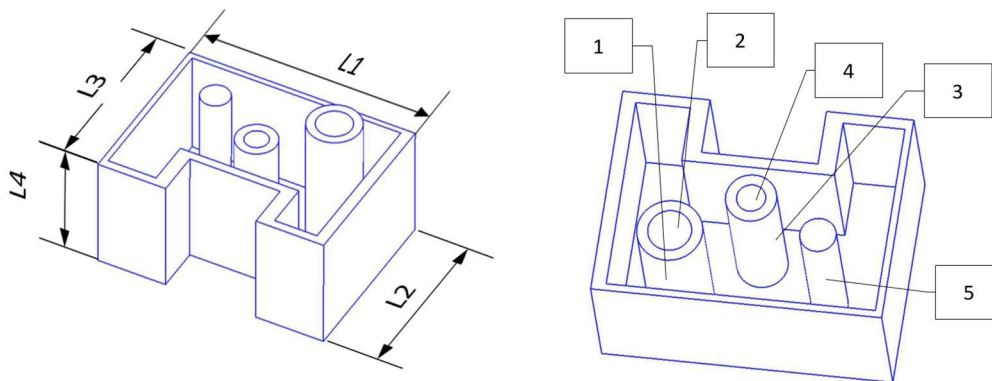
A rekonstrukciót követően a voxeltérfigaton felületmeghatározást végeztem a VGStudio Max 3.5.1 szoftverben. A felületmeghatározásnál az alapbeállításokat használtam. A felületmeghatározás során egy olyan felületi pontfelhő jön létre, amit már dimenzionális mérésekhez lehet felhasználni.

A koordináta-méréstechnikában az egyik legfontosabb a bázisrendszer felvétele. Az egyszerűség kedvéért a bázisrendszert három síkkal határoztam meg és a síkok illesztésénél a legkisebb négyzetes eltérések módszerét (Gauss) használtam. Az elsődleges bázissík az A, a másodlagos bázissík a B és a harmadlagos bázissík a C, az a 34. ábra szerint. A legnagyobb felületű síkot választottam elsődleges bázisnak, mert a nagy felülete miatt ez a sík a legalkalmasabb a sík, azaz három szabadsági fok megkötésére. Az elsődleges és másodlagos síkok metszetéből kapott egyenessel kötöttem meg az irányt, vagyis további két szabadsági fokot. A harmadlagos bázissík és az egyenes metszetéből kapott ponttal a maradék egy szabadsági fokot kötöttem meg. Ezt bázisrendszer felvételi módot 3-2-1 módszernek is nevezik.



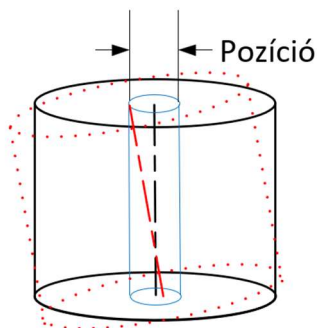
34. ábra: A vizsgálati darab ABC bázisrendszere

A vizsgálati darabon négy sík-sík távolságot határoztam meg, melyek jelölése L1, L2, L3 és L4 a 35. ábra szerint. A síkfelületek mérése során síkokat illesztettem a felületi pontfelhőre. Az egyes síkokhoz a pontokat úgy szelektáltam, hogy az élektől 0,5 mm-es távolságban levágtam a pontokat. Ezzel elkerültem azt, hogy olyan pontokat is használjak a síkok illesztésénél, amik nem tartoznak a síkhoz. A síkokat a legkisebb négyzetes eltérések módszerével (Gauss) illesztettem. A távolságok az illesztett síkok súlypontjai között a koordináta-rendszer tengelyeivel párhuzamos komponensének a hosszát jelentik.



35. ábra: A síklapok távolságainak és hengeres felületeinek a jelölése a vizsgálati darabon

A vizsgálati darabon összesen öt különböző átmérőjű hengeres felület található (36. ábra), amiből három külső és kettő belső hengeres felület. A hengeres felületek mérésének első lépésében ideális hengert kell illeszteni a hengeres felülethez tartozó pontokra. A teljes pontfelhőből a hengeres felülethez tartozó pontfelhőrészletet úgy vágtam ki, hogy a CADn modell megfelelő felületelemét kijelöltem és a szelektálási paramétereknél beállítottam, hogy felületelemet határoló élektől 0,5 mm-re vágja le a pontokat. Az így kapott pontfelhőrészletre Gauss módszerrel illesztettem hengert. Az átmérőértékek, amiket a mérések során kaptam, azok az illesztett ideális hengerek átmérőértékei.

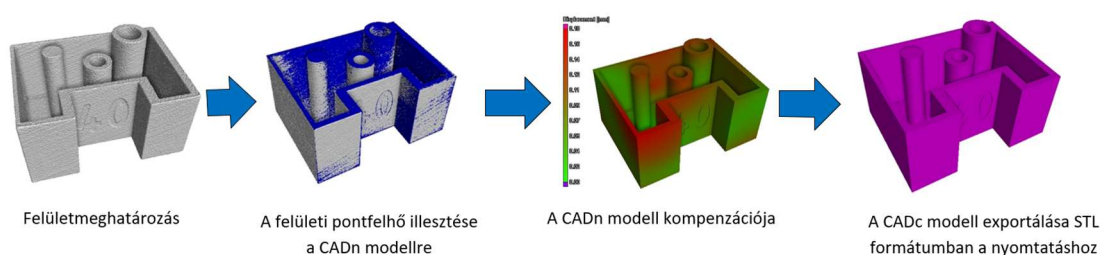


36. ábra: A hengerek pozíciója

A hengeres felületek esetében lehetőség van azok pozícióját is vizsgálni. A pozíció hengerek esetében egy hengerátmérőt jelent, ami érinti a valós felületi pontfelhőre illesztett ideális henger tengelyét. A pozíció értéke egy olyan hengerből származik, aminek a tengelyvonala a nominális pozícióban helyezkedik el (36. ábra). A névleges pozícióban elhelyezkedő henger alsó és felső síkjából a valódi (mért) pontfelhőre illesztett ideális henger tengelye kimetsz egy-egy pontot. A névleges pozícióban lévő tengelyvonal és a távolabbi metszeti pont radiális távolságát kettővel megszorozva kapjuk a mért pozíció értékét.

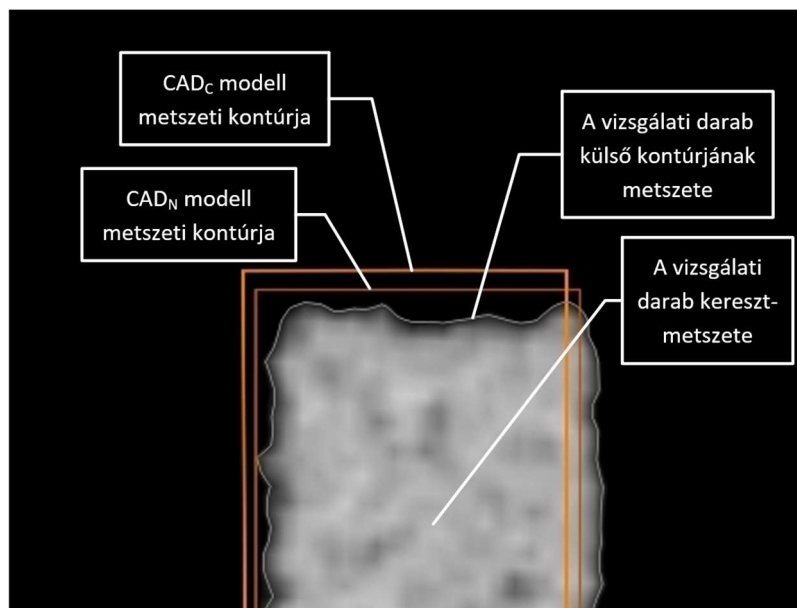
6.3 Torzulás javítása

A torzulások csökkentése érdekében a VGStudio MAX 3.5.1 szoftverben található kompenzációs módszert alkalmaztam. Ez a kompenzációs modul használható fröccsöntő szerszámlapok üregeinek kompenzálására és 3D nyomtatással készült daraboknál is. Ennél a kompenzációs módszernél a CADn modellnek STL formátumban kell rendelkezésre állnia, mert a felületmodelleket nem képes a szoftver kompenzálni. A CADn modell reprezentálja azt a kontúrt, amit a darabnak a lehető legjobban meg kell közelítenie a gyártás során. A valós darabnak a kontúrja és a CADn modell között mindig lesz eltérés, amit gyártási hibának neveznek. A kompenzációt SLS nyomtatási technológiánál az összes munkatérbe helyezett vizsgálati darabnál el kell végezni, mert a munkatéren belüli különböző lokációkban a vizsgálati darabok eltérő hőtechnikai behatásokon mennek keresztül.

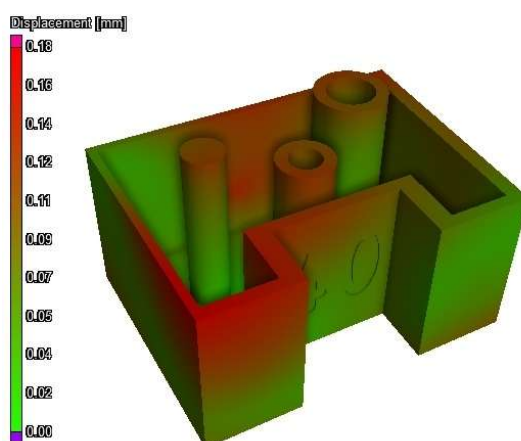


37. ábra: A kompenzációs folyamat lépései

A kompenzációs folyamat lépéseit a 37. ábra szemlélteti. A folyamat első lépésében a vizsgálati darabon felületmeghatározást végeztem, ami egy felületi pontfelhőt eredményezett. A felületi pontfelhőt a CADn modellre illesztettem Gauss módszerrel. A szoftverrel ezután kiszámoltam a felületi pontfelhő és a CADn modell közötti eltéréseket, majd az eltérésekből számolt vektorok mínusz egyszeresével torzítottam a CADn modellt. A kapott CADc modell egy a CADn-hez képest eltorzított 3D modell, amit STL formátumban kiexportálva az ismételt 3D nyomtatáshoz használtam.



38. ábra: A 40-es számú vizsgálati darab térfogati képének egy nagyított metszete, amelyen látszik a mért, a CADn és a CADc kontúrja



39. ábra: A 40-es számú vizsgálati darab kompenzálása során használt elmozdulások eloszlása és nagysága hamisszínes ábrázolással

A kompenzálás során a VGStudio Max 3.5.1 szoftverben 18 vezérpontot használtam a nem egyenközü, racionális B-szplájnok (NURBS) esetében. A nem egyenközü azt jelenti, hogy a B-szplájnok csomópontjai közötti távolság nem egyforma, ez nagy szabadságot ad szabadfelületek létrehozásánál. A racionális azt jelenti, hogy olyan súlyozást alkalmaznak, ami lehetővé teszi másodfokú görbék leképezését, ami sima B-szplájnok esetében nem lehetséges. A kompenzáció során a szoftver egyenletesen elosztva 200000 pontot választ ki és használ fel a vizsgálati darab pontfelhőjéből. A kiválasztott pontok és az illesztett CADn modell közötti eltérést mínusz egyel megszorozva megkaptam azt a vektormezőt, amivel a CADn modellt kompenzálni kell. A vizsgálati darab egy metszeti képén, a CADn és a CADc modelleket metszetben a 38. ábra mutatja. Az ábrán

látható, hogy a CADn modell metszeti kontúrja a valós darab kontúrjától kissé felfelé és balra helyezkedik el.

A CADn és a valós kontúr közötti eltérés mínusz egyel megszorozva egy olyan CADc modellt kapunk, aminek az ábrázolt metszetben a kontúrja még inkább felfelé és balra helyezkedik el a CADn modelltől. Ez a fajta kompenzció lehetővé teszi olyan modellek létrehozását, amiket a 3D nyomtatáshoz használva a vizsgálati darabok kontúrja jobban megközelíti a CADn modell kontúrját. A 40-es vizsgálati darab eltrérései alapján kompenzált CADc modellt, elmozdulásainak mértékével és eloszlásával, hamisszínes megjelenítéssel a 39. ábra mutatja.

6.4 Eredmények

6.4.1 Síklapok távolságai

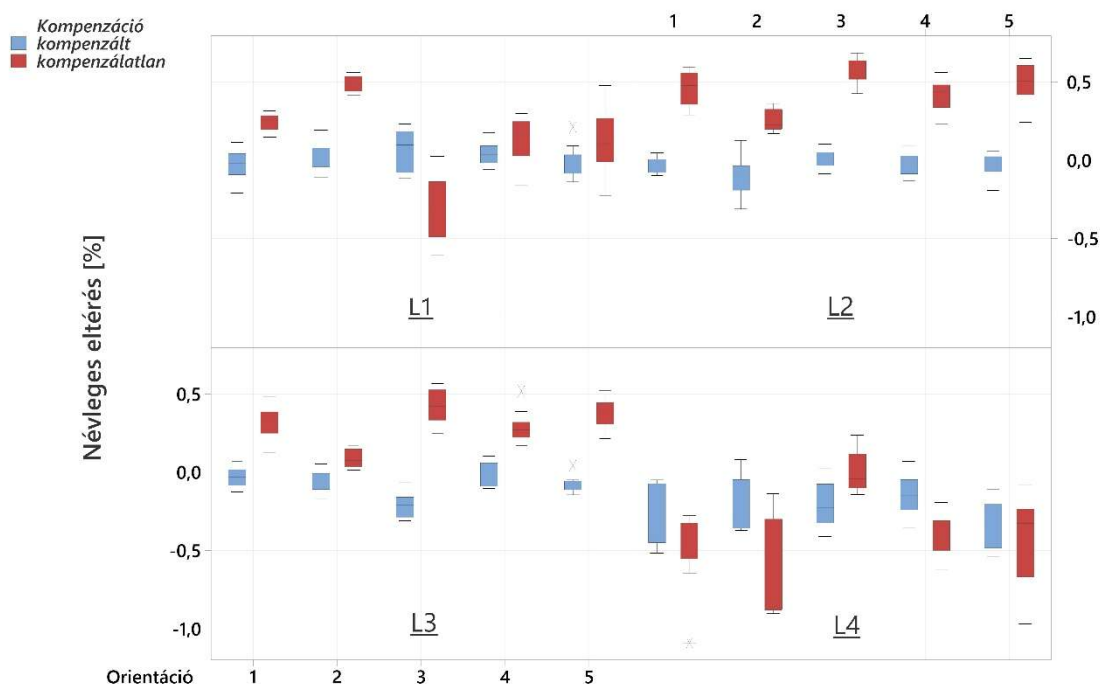
A kísérlet során négy sík-sík távolságot vizsgáltam melyek névleges méretei:

- L1: 40 mm
- L2 és L3: 30 mm
- L4: 20 mm

A 3D nyomtatás során öt különböző orientációban nyomtattam tíz-tíz vizsgálati darabot. A 40. ábra a síklapok távolságainak eltéréseit mutatja a névleges értéktől százalékosan. A százalékos névleges eltérést úgy számoltam ki, hogy a mért érték névlegestől való eltérését elosztottam a névleges értékkel:

$$\text{névleges eltérés \%} = \frac{\text{távolság mért értéke} - \text{névleges érték}}{\text{névleges érték}} \cdot 100[\%] \quad (28)$$

Az így kapott értékek hasonlóak a mérési hibához, de ez a módszer figyelembe veszi a méret hosszát és ahhoz arányosítja, kiküszöbölve a méret hosszának hatását. A 40. ábrán a mérési eredmények dobozdiagramja látható, melyen egy doboz tíz névleges eltérést jelöl. A piros dobozok a kompenzálás nélküli, CADn, a kékek a CADc modellekből gyártott vizsgálati darabok eredményeit mutatja. A diagramon az eredmények orientáció és méret szerint vannak csoportosítva.



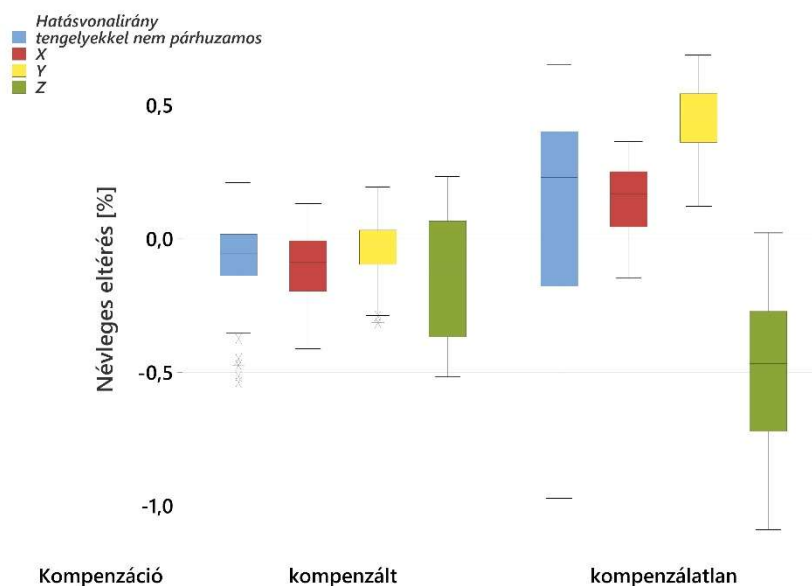
40. ábra: Síklapok távolságainak névleges eltérése %-ban, dobozdiagramon ábrázolva a távolság elnevezése és a kompenzáció szerint csoportosítva

Az L1 és L2 méret esetében a névleges eltérések hasonlóan viselkednek minden orientációban. A 3-as, 4-es és 5-ös orientációban az eredmények szórása csökkent a kompenzáció hatására. Az L1 névleges eltérésének mediánértéke 0,3%-kal javult az 1-es orientációban. A medián 0,5%-kal javult a 2-es orientációban. Az összes vizsgálati darab esetében az 1-es és 2-es orientációban mért névleges eltérés értéke meghaladta a CADc modellből származó adatokat az L1, L2 és L3 távolságoknál. Az L1 esetében mért névleges eltérés átlaga 0,3%-kal kisebb volt, mint a névleges méret a 3-as orientációban. A kompenzáció 0,17%-os túlkompenzációt eredményezett az L1 esetében a 3-as orientációban. A 4-es és 5-ös orientációknál a mediánértékek közelebb kerültek a nulla értékhez, és a szórásuk is kisebb.

A kompenzálatlan esetben a névleges eltérés értéke pozitív mind az 5 orientációban a 2-es és 3-as távolságoknál. A kompenzáció 0,23%-ról -0,07%-ra csökkentette a névleges eltérés értékeit mind az öt orientációban.

A vizsgálati darab különböző orientációi miatt a méretek (L1-4) hatásvonalának az irányja orientációnként változik a nyomtatótér koordináta-rendszeréhez képest. A méretek névleges eltéréseinek százalékos értékét így négy csoportba lehet sorolni, melyek: X, Y és Z irány, illetve az

az eset, amikor egyik tengellyel sem párhuzamos a méret hatásvonala. Ezzel a csoportosítással azt vizsgáltam, hogy a nyomtatótér kalibrációjára milyen hatással van a kompenzáció.



41. ábra: A síklapok távolságának ábrázolása a méret hatásvonal-iránya és kompenzáció szerint csoportosítva

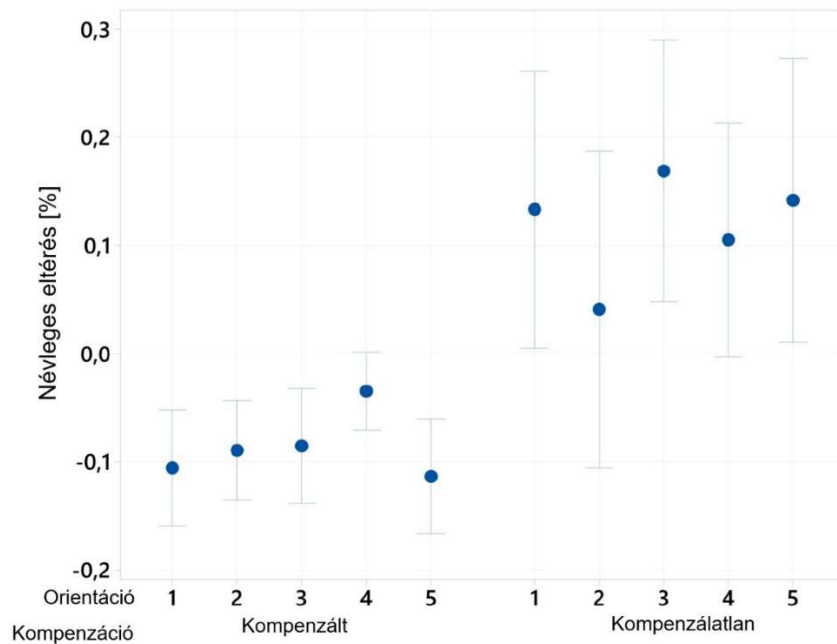
A kompenzálatlan vizsgálati darabok átlagosan minden irányban nagyobb különbséget mutatnak, mint a kompenzáltak. A tengelyekkel nem párhuzamos méretek szintén kisebb különbséget mutatnak a kompenzált vizsgálati darabok esetében. Az XY sík párhuzamos az építési síkkal, amiben a lézer működik a 3D nyomtatási folyamat során. A kompenzálatlan vizsgálati darabok esetében az átlagos különbség 0,15% az X irányban, 0,45% az Y irányban és -0,5% a Z irányban. A kompenzációt követően az átlagos különbség -0,1% az X irányban, -0,05% az Y irányban és -0,15% a Z irányban. A tengelyekkel nem párhuzamos méretek átlagos különbsége 0,1% volt a kompenzáció előtt és -0,07% a kompenzáció után. A 41. ábrán a névleges eltéréseket ábrázoltam %-ban a kompenzáció és a méret hatásvonalirány szerint csoportosítva. Az ábrán jól látható, hogy a méretek névleges értéktől való eltérése a kompenzált esetben közelebb vannak a nem kompenzált esethez képest.

6.5 Statisztikai elemzések a síklapok távolságára

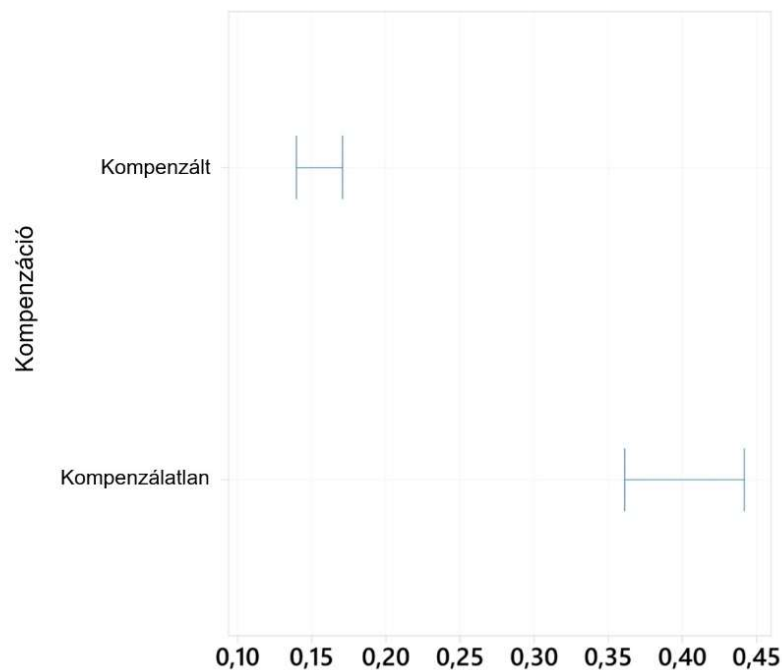
6.5.1 Levene teszt az összes mérési eredményre

A síklapok távolságainak a névleges eltéréseit %-ban ábrázolva a kompenzáció és az orientáció szerint csoportosítva látható, hogy a kompenzálatlan darabok névleges eltérésének a szórása nagyobb, mint a kompenzált daraboké (42. ábra). A kompenzált darabok esetében a névleges

eltérés százalékos tartománya -0,54 % és 0,23 között, míg a kompenzálatlan darabok esetében a tartomány -1,09 % és 0,69 % között van.



42. ábra: a síklapok távolságainál mért névleges értéktől való eltérések a kompenzáció és az orientáció szerint csoportosítva



43. ábra: Levene teszt eredménye a szórások elemzésénél

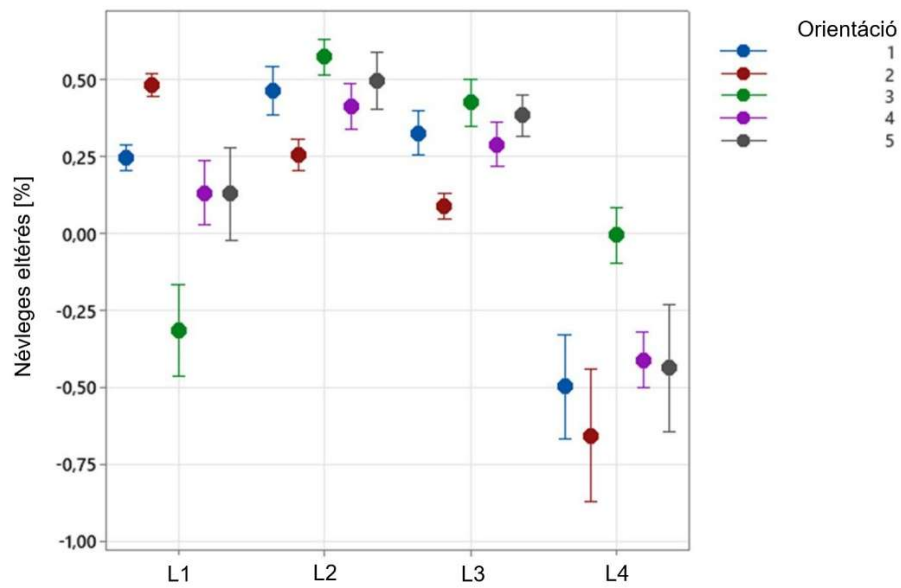
A kompenzált és kompenzálatlan adatokon belüli szórást Levene tesztel vizsgáltam, ami nem normális eloszláson alapuló módszer. A nullhipotézis: nincs szignifikáns különbség a kompenzált

és a kompenzálatlan eredmények szórása között. Az eredmények azt mutatják, hogy a két csoport szórása szignifikánsan különbözik 95%-os konfidenciaszinten (43.ábra). Ha az ábrán a két tartománynak nincs átfedése, akkor a szórások szignifikánsan különböznek. A kompenzált darabok szórása jóval kisebb, mint a kompenzálatlanoké, ami azt jelenti, hogy a kompenzálassal a méretek szórása szignifikánsan csökkenthető.

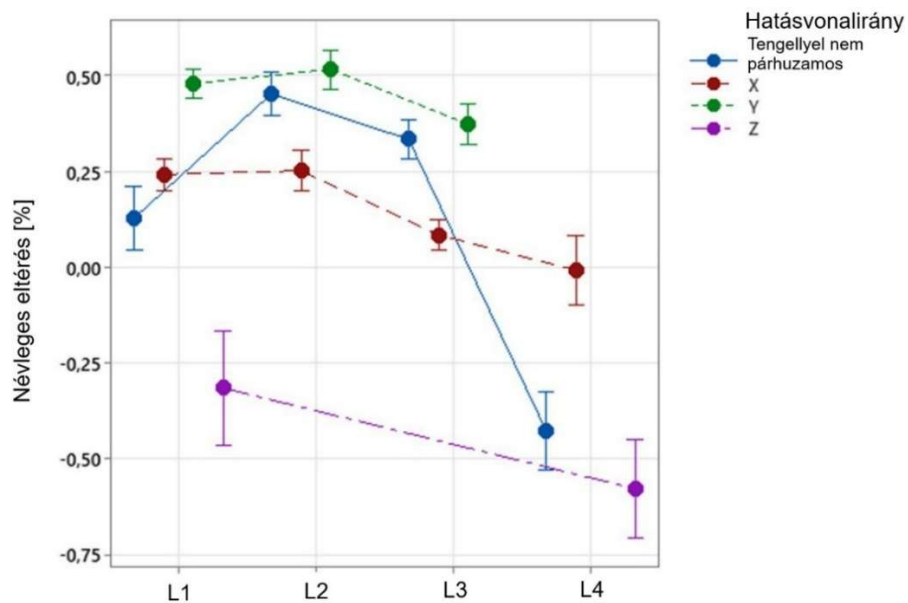
6.5.2 A kompenzálatlan darabok mérési eredményei a síklapok távolságainál

A 3D nyomtatók általános felhasználása során névleges CAD (CADn) modelleket használnak a gyártáshoz. A gyártókamra különböző lokációiban eltérő termomechanikai hatások érik a darabokat. Emiatt a torzulások eltérő mértékűek és irányúak lesznek lokációnként az összes darab esetében. A vizsgálati darabok sík-sík távolságainak az eredményét ábrázolva azt láthatjuk, hogy az L1 és L4 méretek szórása nagyobb, mint az L2 és L3 esetében (44. ábra). Az összes adat maximuma 0,69 %, a minimuma -1,09 % és átlaga pedig 0,12 %.

Ha a síklaptávolságokat hatásvonaluk alapján a gyártókamra koordináta-rendszerének tengelyirányai szerint csoportosítjuk, akkor egy újabb összefüggés is felfedezhető. A 45. ábra az adatokat négy csoportba rendezve mutatja a méretek hatásvonala szerint: X, Y és Z tengellyel párhuzamos, valamint tengellyel nem párhuzamos. A távolságmérésben érintett síkok a 4-es és 5-ös orientációban nem voltak merőlegesek a munkatér koordináta-rendszerének tengelyeire. Ebben a két orientációban a távolságok „tengellyel nem párhuzamos” jelölést kaptak. Az 1-es, 2-es és 3-as orientációban a távolságmérésben érintett síkok merőlegesek voltak az egyik tengelyre (X, Y vagy Z), ami azt jelenti, hogy a távolság hatásvonala párhuzamos volt a gyártógép munkatérének egyik tengelyével. Egy adott méret hatásvonala különböző orientációkban más és más tengelyekkel volt párhuzamos. Az adatokon varianciaanalízist (ANOVA) végeztem, amely kimutatta, hogy a gyártótér koordináta-rendszerének a tengelyirányai 95 %-os szignifikancia szinten szignifikáns hatása van a mért értékekre.



44. ábra: a kompenzálatlan vizsgálati darabok névéges eltérései az orientáció és a távolságok elnevezése szerint csoportosítva, %-ban

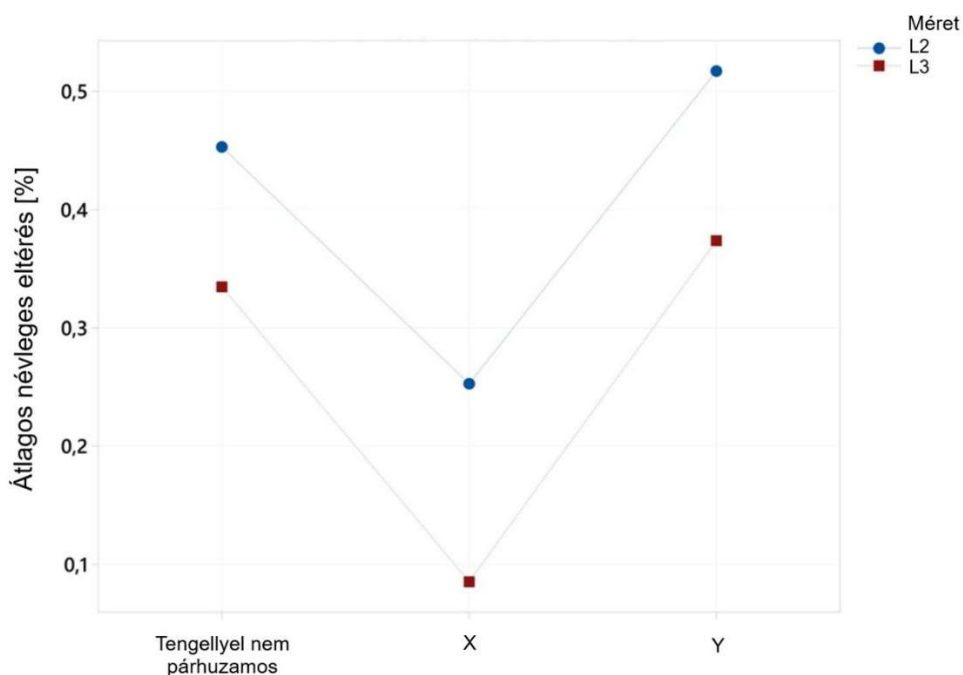


45. ábra: a kompenzálatlan vizsgálati darabok síklaptávolságainak névéges értéktől való eltéréseinek ábrázolása a méret elnevezése és a méret hatásvonaliránya szerint csoportosítva

Az Y és Z tengellyel párhuzamos hatásvonalú távolságoknak szignifikáns hatásuk van az X irányú és a tengelyekkel nem párhuzamos távolságokhoz képest. Mivel egyes méretek hatásvonala a különböző orientációkban más és más irányokba mutat, lehetőségem volt vizsgálni azt, hogy a nyomtató munkaterének koordináta-tengelyei megfelelően vannak-e kalibrálva. Mindhárom tengelyhez külön lehet beállítani egy lineáris skálázást, melyet teszt tárgyak nyomtatásával és

viisszamerésével lehet beállítani. A skálázással lehet a zsugorodást is kiküszöbölni a nyomtatott darabok esetében a dimenzionális eltérések mellett.

A 2-es és 3-as távolság hasonló mintázatot mutat a kompenzálatlan esetben (46. ábra). Az ábrán az eredmények jelölőinek összekötése csak az összetartozó adatok jobb vizuális elkülöníthetőségét szolgálja. Két, rögzített faktoros ANOVA-t végeztem annak megállapítására, hogy van-e szignifikáns különbség a 2-es és 3-as távolság között, valamint a távolságok irányai között (11. táblázat). Az eredmények azt mutatják, hogy szignifikáns különbség van a két távolság és a méretek hatásvonalirányai között is.



46. ábra: Az L2 és L3 méretek névleges eltérésének az átlaga a hatásvonalirány szerint csoportosítva

11. táblázat: ANOVA táblázat az L2 és L3 méretekre

Faktor	Típus	Szintek	Értékek			
Méret hatásvonalának iránya	Rögzített	3	nem párhuzamos tengellyel; X; Y			
Jellemző neve	Rögzített	2	L2; L3			
Forrás	DF	Adj SS	Adj MS	F érték	P érték	
Méret hatásvonalának iránya	2	1,05644	0,528221	48,270	0,000	
Jellemző neve	1	0,46046	0,460460	42,070	0,000	
Méret hatásvonalának iránya x jellemző neve	2	0,00842	0,004211	0,380	0,682	
Hiba	94	1,02873	0,010944			
Összesen	99	2,57107				

A távolság névleges értéke a 2-es és 3-as távolság esetében azonos, ami 30 mm. A két távolságnak az egyik oldalon van egy közös síkja, ami a B bázisfelület. A két távolság másik oldala két kisebb síkhoz csatlakozik. Az ehhez a két kisebb síkhoz csatlakozó falak eltérő falvastagságúak. A 2-es távolság síkja egy 2 mm vastag falhoz, a 3-as távolság pedig egy 1 mm vastag falhoz csatlakozik. A vékonyabb fal érzékenyebb a torzulásra, emiatt a torzulása nagyobb, mint a vastagabb falé. Ez a torzulás úgy húzta el a kisebb síkot, hogy a 3-as távolság kisebb lett, mint a 2-es távolság.

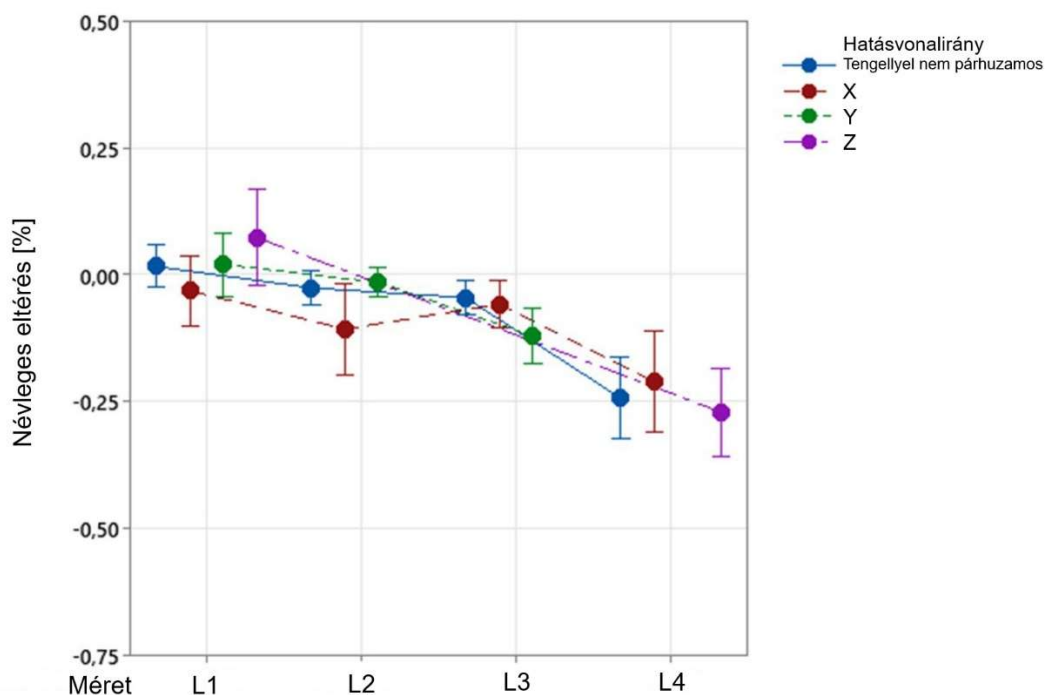
6.5.3 A kompenzált darabok mérési eredményei a síklapok távolságainál

A kompenzált vizsgálati darabokon mért távolságokat külön is megvizsgáltam. A 12. táblázat a kétfaktoros ANOVA eredményeit mutatja. A kompenzált próbatestek esetében az irányok szerinti távolságok névleges különbségértékei 95%-os konfidenciaszinten nem mutatnak szignifikáns különbséget. Látható, hogy a gyártási irányok nincsenek hatással a távolságokra a kompenzált vizsgálati darabok esetében. A névleges különbségek átlaga -0,086%. A korábbi eredmények alapján a méretek hatásvonal-irányának szignifikáns hatása volt, mivel az X, Y és Z tengelyek lineáris skálázási tényezőjének kalibrálása nem lett kellő pontossággal beállítva. Abból a tényből, hogy a távolságok irányának nincs szignifikáns hatása a kompenzált vizsgálati daraboknál, arra a következtetésre jutottam, hogy a CAD modellek kompenzálása kiküszöböli az munkatér kalibrációs hibáit.

12. táblázat: ANOVA táblázat a kompenzált daraboknál az L1-4 távolságokra

Faktor	Típus	Szintek	Értékek		
Jellemző neve	Rögzített	4	L1; L2; L3; L4		
Méret hatásvonalának iránya	Rögzített	4	nem párhuzamos tengellyel; X; Y; Z		
Forrás	DF	Adj SS	Adj MS	F érték	P érték
Méret hatásvonalának iránya	3	0,02466	0,008221	0,58	0,626
Jellemző neve	3	1,75822	0,586074	41,69	0,000
Hiba	193	2,71292	0,014057		
Nem megfelelő illeszkedés	6	0,17805	0,029675	2,19	0,046
Tiszta hiba	187	2,53486	0,013555		
Összesen	199	4,70196			

A nem kompenzált és a kompenzált esetek közötti különbségek a kompenzáció hatásának eredményei. A kompenzáció képes kiküszöbölni az építési kamra kalibrációs és termomechanikai hatásai által okozott torzulások jelentős részét.

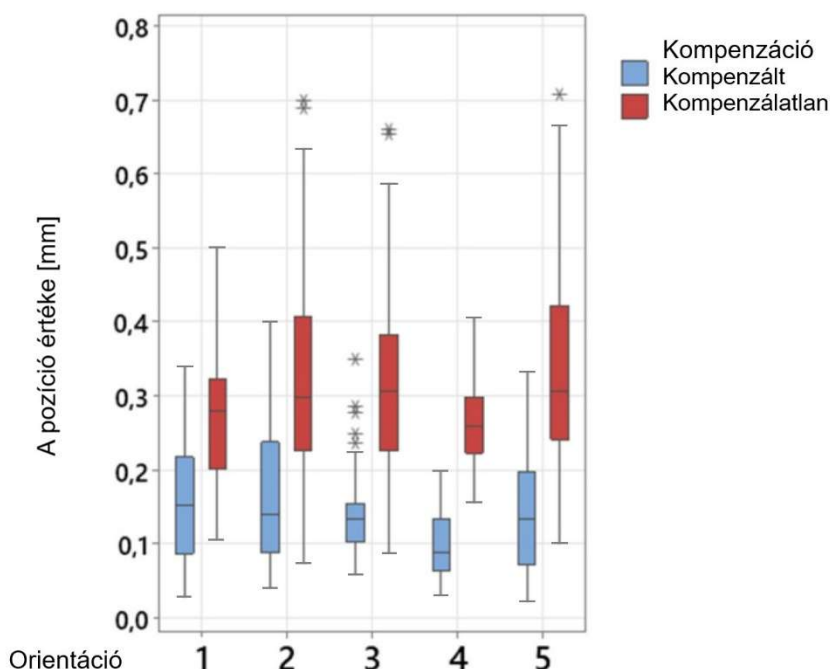


47. ábra: A kompenzált vizsgálati darabokon mért sík-sík távolságok névleges értéktől való %-os eltérése a méret hatásvonal-iránya és a méret elnevezése szerint csoportosítva

Az 47. ábrán az eredmények a méretek (L1-4) szerint vannak csoportosítva, és a színek a távolságok különböző hatásvonal-irányait jelölik. Az adatpontokat összekötöttem, hogy az egyes irányokhoz tartozó adatok könnyebben elkülöníthetők legyenek. Az L1–3 távolságok kisebb %-os névleges eltéréssel rendelkeznek, mint a 4-es távolság értékei. Az, hogy melyik távolságot mérem 95%-os konfidenciaszinten szignifikáns hatással van a névleges eltérés %-os értékeire. A kompenzált és nem kompenzált eredményeket (a 45. és 47. ábrát) összehasonlítva megállapítható, hogy a névleges különbségek sokkal kisebbek a kompenzált esetben.

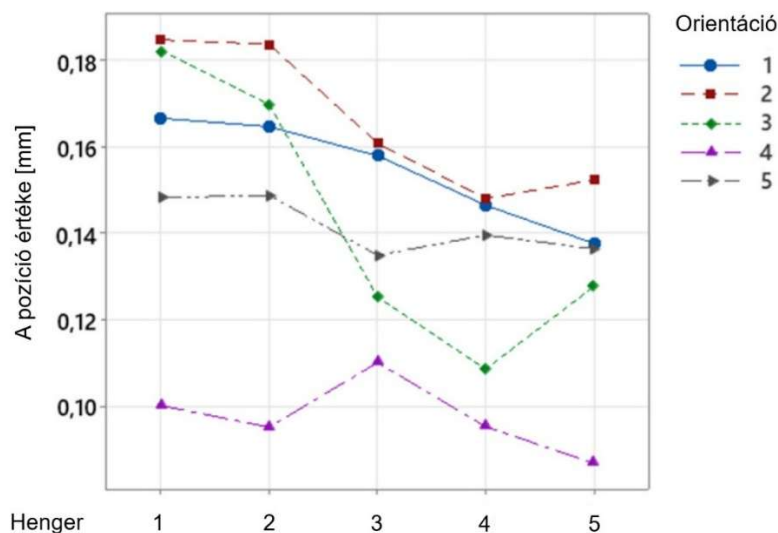
6.6 Hengeres felületek pozícióinak eredményei

Az 48. ábra az összes (100 db) vizsgálati darabon mért pozícióértéket mutatja kompenzáció és orientáció szerint csoportosítva. A kompenzálatlan vizsgálati darabok eredményeit pirossal, a kompenzáltakét kézzel jelöltem. A dobozdiagramon egy doboz 50 mérést jelöl, mivel egy vizsgálati darabon 5 hengeres felületet vizsgáltam és orientációként 10 vizsgálati darabot nyomtattam. A CADc modellekből nyomtatott vizsgálati darabok hengeres felületei szignifikánsan kisebb pozícióhibát mutatnak. A magasabb pozícióérték azt jelenti, hogy az adott elem távolabb van a névleges pozíciótól. A kompenzáció szerint csoportosított pozícióértékek átlagai alacsonyabbak a kompenzált próbatestek esetében.



48. ábra: A vizsgálati darabok hengeres felületeinek a pozíciója orientáció és kompenzáció szerint csoportosítva

Az vizsgálati darabok orientációja a munkatérben szignifikáns hatással van a pozícióértékekre a kompenzált próbatestek esetében. Az 1-es, 2-es, 3-as és 5-ös orientációkban a pozícióértékek szignifikánsan magasabbak, mint a 4-es orientációban (49. ábra). A 49. ábrán egy adatpont 10 vizsgálati darab azonos hengeres felületének az átlagolt pozícióértékét jelöli. Az ábrán a diszkrét adatpontok összekötése csak a jobb elkülöníthetőséget szolgálja. A pozícióértékek átlaga alacsonyabb, tehát jobb, ha a vizsgálati darabokat a munkatérben X és Y tengely körül 15° -al elforgatjuk. Ennek az lehet az oka, hogy a nyomtatás során a rétegenként a lézer által bevitt energia mennyiségének változása egyenletesebben oszlik el egy darab nyomtatása során az építési rétegek között a 4-es orientációban. Az 1-es és a 3-as orientációban a vizsgálati darab legnagyobb sík felülete, amin a hengeres felületek is megtalálhatók, párhuzamos az építési síkkal. Ez a legnagyobb síkfelület nyomtatásánál okoz egy nagy kiugrást az energiaközlésben. A legnagyobb síkfelület kinyomtatása után hirtelen lecsökken a rétegenkénti energiaközlés egy darabra nézve. A 4-es orientációban a vizsgálati darab nyomtatása az elforgatás miatt az egyik sarkától kezdődik és a lézer által megvilágított keresztmetszetek felületének nagysága kiugrások nélkül változik rétegről rétegre, egyenletesebb energiaközlést biztosítva. Ez kisebb hőmérsékleti gradienseket okoz a vizsgálati darabban és ezáltal kisebb torzulást is.



49. ábra: A vizsgálati darab hengeres felületeinek a pozícióértékei a hengeres felületek azonosítója és az orientáció szerint csoportosítva

Ahhoz, hogy bebizonyítsam a kompenzált vizsgálati darabokon az orientáció szignifikáns hatását Kruskal-Wallis (egyutas nemparametrikus ANOVA) tesztet végeztem. A nullhipotézis az, hogy az orientáció nincs hatással a pozícióértékekre. Az eredményeket az 13. táblázat mutatja. A Dwass-Steel-Critchlow-Fligner páronkénti összehasonlítás azt mutatja, hogy a 4-es orientáció szignifikánsan különbözik az 1-es, 2-es és 3-as orientációtól, mivel a P-érték kisebb, mint 0,05 [211].

13. táblázat: Kruskal-Wallis teszt eredménye a pozícióértékekre

		χ^2	df	P	ε^2
Pozíció [mm]		22,2	4	<0,001	0,0891
Páronkénti összehasonlítás - pozíciók [mm]					
			W	P	
1	2		0,648	0,991	
1	3		-1,033	0,950	
1	4		-5,089	0,003	
1	5		-1,160	0,925	
2	3		-0,999	0,955	
2	4		-5,635	<0,001	
2	5		-1,848	0,687	
3	4		-5,689	<0,001	
3	5		-0,678	0,989	
4	5		3,715	0,066	

6.7 Következtetések

A 6. fejezetben bemutatott kutatásban azt vizsgáltam, hogy az SLS technológiával gyártott alkatrészek pontossága javítható-e egy XCT méréseken alapuló kompenzációs módszerrel. A kísérletben arra kerestem a választ, hogy ez az eljárás mennyire hatékonyan képes csökkenteni a gyártás közbeni torzulásokat, és kiküszöböli-e a nyomtatási orientációból fakadó eltéréseket.

A kutatásom legfőbb megállapítása, hogy az alkalmazott XCT alapú kompenzációs módszerrel a gyártott alkatrészek minősége javítható. A kompenzált alkatrészekeken mért sík-sík távolságok nem csak közelebb kerültek a névleges méretekhez, de a méretek szórása is szignifikánsan csökkent. Ez azt jelenti, hogy a gyártási folyamat nemcsak pontosabbá, hanem egyúttal stabilabbá is vált.

A vizsgálat egy másik eredménye, hogy a vizsgálatához használt kompenzációs módszer a nyomtató munkaterének kalibrációs hibáit is képes korrigálni. Míg a kompenzálatlan daraboknál a méretek pontossága erősen függött attól, hogy a méret hatásvonaliránya a munkatér mely koordináta-tengelyével párhuzamos, addig a kompenzált alkatrészeknél ez az irányfüggőség statisztikailag kimutathatóan megszűnt. Ez bizonyítja, hogy a módszer a gép általános, szisztematikus hibáit is hatékonyan kompenzálja.

A hengeres felületek pozícióinak elemzésénél kimutattam, hogy bár a kompenzáció szignifikánsan csökkentette a pozícióhibát, az alkatrész orientációja, mint befolyásoló tényező hatása továbbra is szignifikáns maradt. A legjobb eredményt az X és X tengely mentén 15 fokban megdöntött orientáció adta, ami vélhetően az egyenletesebb rétegenkénti hőbevitelnek köszönhető.

Bár a kísérleteim során DuraForm ProX PA12 alapanyagot és ProX SLS 6100 típusú berendezést használtam, az általam vizsgált, röntgentomográfiás mérésekre épülő, invertált CAD-kompenzációs munkafolyamat technológiafüggetlen matematikai és mérés technikai elveken nyugszik, így más rendszerekre is átvihető. Az eljárás általánosíthatóságát és gyakorlati alkalmazhatóságát alapvetően két fizikai tényező korlátozza. Az egyik ilyen tényező a vizsgált anyag viselkedése, hiszen a kompenzáció olyan polimereknél lehet működőképes, amelyeknél a zsugorodás és a torzulás a PA12-höz hasonlóan makroszkopikus és irányfüggő. A másik döntő szempont a gép és a folyamat stabilitása, ugyanis a kompenzációt csak akkor lehet sikeresen alkalmazni más AM technológiáknál, ha az adott gép saját ismétlési hibája és szórása lényegesen kisebb, mint a korrigálni kívánt, hőhatások okozta szisztematikus torzulások mértéke.

7 Összegzett következtetések

7.1 Új tudományos eredmények

1. **Tézis:** Kidolgoztam és validáltam egy olyan, a röntgen- (XCT) és neutrontomográfiás (NCT) rendszerek objektív metrológiai összehasonlítására alkalmas módszertant [212] és az ezt megvalósító új kalibrációs fantomot, melynek anyagszerkezeti kritériumait úgy határoztam meg, hogy azok mindkét képalkotó eljárás számára megfelelő kontrasztot biztosítsanak [213], miközben a neutronsugárzás utáni alacsony aktivitás és rövid felezési idő lehetővé teszi az etalon biztonságos és ismételt felhasználását [213]. A modellt sikeresen validáltam ittrium-oxid-dal 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 [212]. 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 ($|E_N| \leq 1$) [212]. 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 [214].
 - 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) [214].
 - 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 [214]. A mérési hiba a légrések növekedésével (25 μm -tól 125 μm -ig) szisztematikusan növekszik, majd a légrés nélküli szegmenseknél csökken [214].

- 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 [214, 215].
- 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 [215].
- a. Egyanyagú vizsgálati darabok esetén igazoltam, hogy a kisebb voxelméret (68 μm) következetesen magasabb kontraszt-zaj arányt (CNR) és alacsonyabb mérési hibákat eredményeznek, mint a nagyobb voxelméret (149 μm). 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 [215].
 - b. Többanyagú vizsgálati darabok esetén bizonyítottam, hogy a légrések jel-zaj aránya (SNR) arányosan csökken a légrés növekedésével (25 μm -tól 125 μm -ig) az alumínium és POM anyagok közötti határfelületen, míg a légrések szűrkeségi értékei jellegzetes elkülönülési mintázatokat mutatnak a detektor pixelegyesítési mód, voxelméret és forgatási mód függvényében [215].
- 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 [216, 217, 218] 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 [216]. Ezen felül bizonyítottam, hogy a kompenzáció hatása mellett az orientáció optimális megválasztásával a hengeres felületek pozíciója szignifikáns mértékben javítható [219].

8 Irodalomjegyzék

- [1] Lewis, A. J. (2021). Dimensional metrology in practice. *New Frontiers for Metrology: From Biology and Chemistry to Quantum and Data Science*, 23.
- [2] Zhao, Y., Xu, X., Kramer, T., Proctor, F., & Horst, J. (2011). Dimensional metrology interoperability and standardization in manufacturing systems. *Computer Standards & Interfaces*, 33(6), 541-555.
- [3] Nzumile, J. M., Pastory, D., & Taifa, I. W. (2024). Applicability of Metrology 4.0 technologies for the manufacturing industries. *MAPAN*, 39(3), 559-571.
- [4] Meškuotienė, A., Dobilienė, J., Raudienė, E., & Gaidamovičiūtė, L. (2022). A review of metrological supervision: towards the common understanding of metrological traceability in legal and industrial metrology. *Mapan*, 37(3), 693-701.
- [5] Macii, D. (2023). Basics of industrial metrology. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 26(6), 5-12.
- [6] Bánkuti László and Kiss József. Nemzetközi metrológiai értelmező szótár: Alapvető és általános fogalmak, kapcsolódó szakkifejezések. Akkreditált Szervezetek Klasztere (ASZEK), 2018. Magyar fordítás a *Vocabulaire International de Métrologie* 3e édition (VIM3) alapján; https://aszek.hu/wp-content/uploads/2018/12/VIM_3_HU.pdf
- [7] Hackel, S., Schönhals, S., Doering, L., Engel, T., & Baumfalk, R. (2023). The digital calibration certificate (DCC) for an end-to-end digital quality infrastructure for industry 4.0. *Sci*, 5(1), 11.
- [8] Kniel, K., Fluegge, J., & Bosse, H. (2019). New ways of metrological traceability in length and coordinate metrology. *TM-TECHNISCHES MESSEN*, 86(9), 487-501.
- [9] Gaska, A., Śladek, J., & Gaska, P. (2020, May). Challenges for uncertainty determination in dimensional metrology put by industry 4.0 revolution. In *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing: AMP 2020* (pp. 92-104). Cham: Springer International Publishing.
- [10] Sonne, M. R., Mohammadi, A., Dalla Costa, G., Madruga, D. G., De Chiffre, L., & Hattel, J. H. (2018). Considerations on numerical modelling for compensation of in-process metrology in manufacturing. In *18th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen 18)* (pp. 453-454). The European Society for Precision Engineering and Nanotechnology.

- [11] Magyar Szabványügyi Testület. (2017). MSZ EN ISO 1101:2017 Geometriai termékjellemzők (GPS). Geometriai tűréskezelés. Alak-, irány-, helyzet- és ütéstűrések (ISO 1101:2017). MSZT.
- [12] Toteva, P., Vasileva, D., & Mihaylova, N. (2014). New standards in the field of geometrical product specifications. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 12(2), p85.
- [13] Bodini, I., Baronio, G., Paderno, D., Villa, V., Martinelli, P., Frizza, R., ... & Uberti, S. (2024). GPS-navigator: an advanced search engine to gather information and navigate through standards in the field of geometrical product specification. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(8), 6289-6299.
- [14] Humienny, Z. (2009). State of art in standardization in GPS area. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(1), 1-7.
- [15] Aidibe, A., Tahan, S. A., & Kamali Nejad, M. (2020). Interlaboratory empirical reproducibility study based on a GD&T benchmark. *Applied sciences*, 10(14), 4704.
- [16] Zupan, S., & Kunc, R. (2024). Overview of principles and rules of geometrical product specifications according to the current ISO standards. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 70(1-2), 3-19.
- [17] Maltauro, M., & Morse, E. (2023). Towards a Definition of “Geometric Verification Specifications” Within the ISO GPS System. *Procedia CIRP*, 119, 339-344.
- [18] Jiang, X. J., & Scott, P. J. (2020). *Advanced metrology: freeform surfaces*. Academic Press.
- [19] Nielsen, H. S. (2006). New concepts in specifications, operators and uncertainties and their impact on measurement and instrumentation. *Measurement Science and Technology*, 17(3), 541-544.
- [20] Henzold, G. (2006). *Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection: a handbook for geometrical product specification using ISO and ASME standards*. Elsevier.
- [21] Humienny, Z., & Zdrojewski, P. (2023). ISO GPS and ASME GDT standards—differences and similarities in definitions of measurands. *Metrology and Measurement Systems*, 791-808.
- [22] 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.

- [23] Ostertagova, E., Ostertag, O., & Kováč, J. (2014). Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. *Applied mechanics and materials*, 611, 115-120.
- [24] Palermo, F., Cognolato, M., Gijssberts, A., Müller, H., Caputo, B., & Atzori, M. (2017, July). Repeatability of grasp recognition for robotic hand prosthesis control based on sEMG data. In *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (pp. 1154-1159). IEEE.
- [25] Unguryanu, T. N., & Grijbovski, A. M. (2014). Analysis of three independent groups using non-parametric Kruskal-Wallis test in STATA software. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 21(6), 55-58.
- [26] Vargha, A., & Delaney, H. D. (1998). The Kruskal-Wallis test and stochastic homogeneity. *Journal of Educational and behavioral Statistics*, 23(2), 170-192.
- [27] Klotz, J., & Teng, J. (1977). One-way layout for counts and the exact enumeration of the Kruskal-Wallis H distribution with ties. *Journal of the American Statistical Association*, 72(357), 165-169.
- [28] Zimmerman, D. W. (2000). Statistical significance levels of nonparametric tests biased by heterogeneous variances of treatment groups. *The Journal of general psychology*, 127(4), 354-364.
- [29] Dinno, A. (2015). Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test. *The Stata Journal*, 15(1), 292-300.
- [30] Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (Eds.). (2018). *Industrial X-ray computed tomography* (Vol. 10, pp. 978-973). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [31] Ferrucci, M., & Ametova, E. (2021). Charting the course towards dimensional measurement traceability by X-ray computed tomography. *Measurement Science and Technology*, 32(9), 092001.
- [32] 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.
- [33] Aloraini, G. S. A. M., & Alanazi, M. R. (2024). X-Ray Interaction Mechanisms in Medical Imaging: A Critical Exploration. *Journal of Ecohumanism*, 3(8), 952-959.
- [34] Stritt, C., Plamondon, M., Hofmann, J., & Flisch, A. (2017). Influence of scatter in X-ray imaging and scatter correction methods for industrial applications. In *Handbook of X-ray Imaging* (pp. 959-968). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351228251>
- [35] Chatti, S., Laperrière, L., Reinhart, G., & Tolio, T. (2019). *CIRP encyclopedia of production engineering*. Springer.

- [36] Villarraga-Gómez H, Smith ST (2020) Effect of the number of projections on dimensional measurements with X-ray computed tomography. *Precis. Eng.* 66:445–456.
- [37] Kalender, W. A. (2011). *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. John Wiley & Sons. Medical Physics. 33(8), 3076.
- [38] Martz, H. E., Logan, C. M., Schneberk, D. J., & Shull, P. J. (2016). *X-ray Imaging: fundamentals, industrial techniques and applications*. CRC Press. 1-571.
- [39] Seeram, E. (2015). *Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control*. Elsevier. 1-576.
- [40] Abdullah, M.Z., Ashaari, N.A., Aziz, M.A. (2009). Development of a neutron tomography system for industrial applications. *Measurement*, 42(7), 1017–1026.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Sun, W., Symes, D.R., Brenner, C.M., et al. (2022). Review of high energy x-ray computed tomography for non-destructive dimensional metrology of large metallic advanced manufactured components. *Reports on Progress in Physics*, 85(1), 016102.
- [44] 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.
- [45] Kardjilov, N., Hilger, A., Manke, I., Strobl, M., Dawson, M., Williams, S., Banhart, J. (2011). Neutron tomography instrument CONRAD at HZB. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 651, 47–52.
- [46] Kockelmann, W., Minniti, T., Pooley, D. E., Burca, G., Ramadhan, R., Akeroyd, F. A., ... & Nightingale, J. (2018). Time-of-flight neutron imaging on IMAT@ ISIS: a new user facility for materials science. *Journal of Imaging*, 4(3), 47.
- [47] Kardjilov, N., Manke, I., Hilger, A., Strobl, M., & Banhart, J. (2011). Neutron imaging in materials science. *Materials Today*, 14(6), 248-256.
- [48] Minniti, T., Watanabe, K., Burca, G., Pooley, D. E., & Kockelmann, W. (2018). Characterization of the new neutron imaging and materials science facility IMAT. *Nuclear*

- Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 888, 184-195.
- [49] Lehmann, E. H., & Boillat, P. (2023). Advances in scintillator screen technology for neutron imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1053, 168324.
 - [50] Kastner, J., & Heinzl, C. (2015). X-Ray computed tomography for non-destructive testing and materials characterization. In: *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications* (pp. 227–250). Springer.
 - [51] Thompson, A., Maskery, I., & Leach, R. K. (2016). X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review. *Measurement Science and Technology*, 27(7), 072001.
 - [52] Jansson, A., Ekengren, J., Zekavat, A. R., & Pejryd, L. (2016). Effects of X-ray penetration depth on multi material computed tomography measurements. In 6th H Conference on Industrial Computed Tomography.
 - [53] 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.
 - [54] O.M.H. Ahmed, Y. Song, Z. Xie, Theoretical beam hardening correction for industrial x-ray computed tomography. *J. Eng. Technol. Sci.* 51(6), 870–881 (2019).
 - [55] Lifton, J. J., Malcolm, A. A., & McBride, J. W. (2016). An experimental study on the influence of scatter and beam hardening in x-ray CT for dimensional metrology. *Measurement Science and Technology*, 27(1), 015007.
 - [56] Wiegert, J., Engel, K. J., & Herrmann, C. (2009, March). Impact of scattered radiation on spectral CT. In *Medical Imaging 2009: Physics of Medical Imaging* (Vol. 7258, pp. 1232-1241). SPIE.
 - [57] Mikhailov, I. F., Baturin, A. A., Mikhailov, A. I., Borisova, S. S., & Surovitskiy, S. V. (2020). Dependence of the Compton to Rayleigh intensity ratio on the scatterer atomic number in the range of 4 (Be) to 31 (Ga). *X-Ray Spectrometry*, 49(2), 284-290.
 - [58] Osipov, S. P., Chakhlov, S. V., Zhvyrbliya, V. Y., Sednev, D. A., Osipov, O. S., & Usachev, E. Y. (2023). The nature of metal artifacts in X-ray computed tomography and their reduction by optimization of tomography systems parameters. *Applied Sciences*, 13(4), 2666.

- [59] Trotta, L. D. S., Matenine, D., Martini, M., Stierstorfer, K., Lemarechal, Y., Francus, P., & Despres, P. (2022). Beam-hardening corrections through a polychromatic projection model integrated to an iterative reconstruction algorithm. *NDT & E International*, 126, 102594.
- [60] 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).
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Höger, K., Schild, L., & Lanza, G. (2022). Influence of workpiece orientation for multimaterial measurements in dimensional computed tomography. In 11th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT).
- [64] Arenhart, F. A., Nardelli, V. C., & Donatelli, G. D. (2016). Comparison of surface-based and image-based quality metrics for the analysis of dimensional computed tomography data. *Case studies in nondestructive testing and evaluation*, 6, 111-121.
- [65] 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.
- [66] Greffier, J., Larbi, A., Frandon, J., Moliner, G., Beregi, J. P., & Pereira, F. (2019). Comparison of noise-magnitude and noise-texture across two generations of iterative reconstruction algorithms from three manufacturers. *Diagnostic and interventional imaging*, 100(7-8), 401-410.
- [67] Park, C., Choo, K. S., Jung, Y., Jeong, H. S., Hwang, J. Y., & Yun, M. S. (2021). CT iterative vs deep learning reconstruction: comparison of noise and sharpness. *European radiology*, 31(5), 3156-3164.
- [68] Reiser, I., Lu, Z., & Nishikawa, R. (2012). TH-E-217BCD-01: Contrast-To-Noise Ratio Is Not an Appropriate Measure of CT Image Quality When Comparing Different Iterative Reconstruction Algorithms. *Medical Physics*, 39(6Part31), 4014-4014.

- [69] Feldkamp, L. A. (1997). Practical cone beam algorithm. *J. Microsc.*, 185, 67-75.
- [70] Gupta, U., & Ranjan, U. (2023). Algebraic reconstruction techniques. In *Encyclopedia of mathematical geosciences* (pp. 17-24). Cham: Springer International Publishing.
- [71] Yue, K., Shao, H., Petrò, S., & Moroni, G. (2024). Evaluation of reconstruction methods in X-ray computed tomography geometric measurement. *Procedia CIRP*, 129, 139-144.
- [72] Yue, K., Shao, H., Petrò, S., & Moroni, G. (2026). Extent of projection reduction in XCT dimensional measurements using OS-SART under beam-hardening effects. *Measurement*, 121769.
- [73] Berez, J., Praniewicz, M., & Saldana, C. (2023). Dimensional X-Ray computed tomography: Apparent feature form error and its effect on measurement tasks. *Precision Engineering*, 79, 94-108.
- [74] Gao, Z., Zhang, X., & Pan, B. (2026). Accuracy enhancement of DVC measurement on volumetric images reconstructed with fewer projections via deep learning. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 41(6), 3152-3174.
- [75] Ahmad, F., Yang, G., Buchfink, M., Alsaffar, A., Baraka, A., Liu, X., & Simon, S. (2026). Compensating Streak Artifacts in Sparse-View Inline Industrial CT for Accurate Metrology using Self-Supervised Optimization of Implicit Neural Volume Representations. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 45(1), 19.
- [76] Polevoy, D., Kazimirov, D., Gilmanov, M., & Nikolaev, D. (2025). No reproducibility, No progress: rethinking CT benchmarking. *Journal of Imaging*, 11(10), 344.
- [77] Otsu, N. (1975). A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11, 285-296.
- [78] Canny, J. F. (1986). A computation approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 8(6), 670-700.
- [79] Yagüe-Fabra, J. A., Ontiveros, S., Jiménez, R., Chitchian, S., Tosello, G., & Carmignato, S. (2013). A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications. *CIRP Annals*, 62(1), 531-534.
- [80] Hangartner, T. N. (2007). Thresholding technique for accurate analysis of density and geometry in QCT, pQCT and muCT images. *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, 7(1), 9.
- [81] Ahmad, N. S., Zaki, Z. M., & Ismail, W. (2014, September). Region of adaptive threshold segmentation between mean, median and otsu threshold for dental age assessment. In

- 2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT) (pp. 353-356). IEEE.
- [82] Barnes, J. E. (1992). Characteristics and control of contrast in CT. *Radiographics*, 12(4), 825-837.
- [83] Khan, R. Q., Shakir, H., & Khan, W. Q. (2024, August). Enhancing Histopathological Breast Cancer Classification with Thresholding Techniques and Transfer Learning Models. In 2024 International Visualization, Informatics and Technology Conference (IVIT) (pp. 71-77). IEEE.
- [84] Jaques, V. A., Plessis, A. D., Zemek, M., Šalplachta, J., Stubianová, Z., Zikmund, T., & Kaiser, J. (2021). Review of porosity uncertainty estimation methods in computed tomography dataset. *Measurement Science and Technology*, 32(12), 122001.
- [85] DaPonte, J. S., Clark, M., Damon, M., Kamins, R., Sadowski, T., & Tirrell, C. (2005, May). Visual enhancement of micro CT bone density images. In *Visual Information Processing XIV* (Vol. 5817, pp. 64-75). SPIE.
- [86] Kak, A. C., & Slaney, M. (2001). *Principles of computerized tomographic imaging*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [87] Beutel, J. (2000). *Handbook of medical imaging* (Vol. 3). Spie Press.
- [88] 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.
- [89] Hiller, J., Sawczyn, N., Imkamp, D., & Uhlmann, E. (2017). Untersuchungen zur messunsicherheit und wirtschaftlichkeit dimensioneller computertomographie-messungen an ausgewählten beispielen. *tm-Technisches Messen*, 84(5), 336-347.
- [90] Zende, S., Hofmann, N., & Feth, N. A. (2024, May). Applications of industrial computed tomography in the manufacturing process of medical implants made from nitinol. In *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies* (Vol. 84840, pp. 121-122). ASM International.
- [91] Sun, L. (2006). Technical property and application of industrial computed tomography. *NUCLEAR ELECTRONICS AND DETECTION TECHNOLOGY*, 26(4), 486.
- [92] Ontiveros, S., Yagüe-Fabra, J. A., Jiménez, R., Tosello, G., Gasparin, S., Pierobon, A., ... & Hansen, H. N. (2012). Dimensional measurement of micro-moulded parts by computed tomography. *Measurement Science and Technology*, 23(12), 125401.

- [93] Tao, L., Huo, C., Zhou, J., & Zhou, S. (2024, November). The performance evaluation for dimensional measurements with industrial computed tomography systems. In *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications XI* (Vol. 13241, pp. 192-194). SPIE.
- [94] 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.
- [95] Allen, M., & Ramsey, A. T. (2005, January). Advances in the Computed Tomography of Turbine Blades. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 4725, pp. 821-834).
- [96] Villarraga-Gómez, H., Herazo, E. L., & Smith, S. T. (2019). X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology. *Precision Engineering*, 60, 544-569.
- [97] Schrapp, M., Scharrer, T., Goldammer, M., Rupitsch, S. J., Sutor, A., Ermert, H., & Lerch, R. (2013). Artifact reduction in non-destructive testing by means of complementary data fusion of x-ray computed tomography and ultrasonic pulse-echo testing. *Measurement Science and Technology*, 24(12), 125403.
- [98] Villarraga-Gómez, H., Lee, C., & Smith, S. T. (2018). Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures. *Precision Engineering*, 51, 291-307.
- [99] Bircher, B. A., Neuhaus, S., Küng, A., & Meli, F. (2021). Measurement of temperature induced x-ray tube transmission target displacements for dimensional computed tomography. *Precision Engineering*, 72, 409-416.
- [100] Villarraga-Gómez, H., & Smith, S. T. (2022). Effect of geometric magnification on dimensional measurements with a metrology-grade X-ray computed tomography system. *Precision Engineering*, 73, 488-503.
- [101] Zwanenburg, E. A., Williams, M. A., & Warnett, J. M. (2022). Performance testing of dimensional X-ray computed tomography systems. *Precision Engineering*, 77, 179-193.
- [102] Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (Eds.). (2018). *Industrial X-ray computed tomography* (Vol. 10, pp. 978-973). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [103] Matsuzaki, K., Sato, O., Fujimoto, H., Abe, M., & Takatsuji, T. (2017). Feasibility of dimensional gauges made of plastic used for acceptance tests of coordinate measuring systems. *Precision Engineering*, 50, 308-312.
- [104] Dewulf, W., Ferrucci, M., Ametova, E., Heřmánek, P., Probst, G., Boeckmans, B., ... & Carmignato, S. (2018). Enhanced dimensional measurement by fast determination and

- compensation of geometrical misalignments of X-ray computed tomography instruments. *CIRP Annals*, 67(1), 523-526.
- [105] Stolfi, A., & De Chiffre, L. (2016). 3D artefact for concurrent scale calibration in Computed Tomography. *CIRP Annals*, 65(1), 499-502.
- [106] Staude, A., Bartscher, M., Ehrig, K., Goebbels, J., Koch, M., Neuschaefer-Rube, U., & Nötel, J. (2011). Quantification of the capability of micro-CT to detect defects in castings using a new test piece and a voxel-based comparison method. *NDT & E International*, 44(6), 531-536.
- [107] Hermanek, P., & Carmignato, S. (2016). Reference object for evaluating the accuracy of porosity measurements by X-ray computed tomography. *Case studies in nondestructive testing and evaluation*, 6, 122-127.
- [108] Hermanek, P., Zanini, F., & Carmignato, S. (2019). Traceable porosity measurements in industrial components using X-ray computed tomography. *Journal of manufacturing Science and Engineering*, 141(5), 051004.
- [109] ISO 15530-3: 2011. (2011). Geometrical product specifications (GPS)—coordinate measuring machines (CMM): technique for determining the uncertainty of measurement—part 3: use of calibrated workpieces or measurement standards.
- [110] Jansson, A., Hermanek, P., Pejryd, L., & Carmignato, S. (2018). Multi-material gap measurements using dual-energy computed tomography. *Precision engineering*, 54, 420-426.
- [111] Reiter, M., de Oliveira, F. B., Bartscher, M., Gusenbauer, C., & Kastner, J. (2019). Case study of empirical beam hardening correction methods for dimensional X-ray computed tomography using a dedicated multi-material reference standard. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38(1), 10.
- [112] Qsymah, A., Younes, F. B., Ayasrah, M. M., & Alawneh, M. (2024, October). X-Ray Computed Tomography for Additive Manufacturing. In *International Conference on Optimization Driven Architectural Design* (pp. 251-260). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [113] Petit, C., Meille, S., & Maire, E. (2013). Cellular solids studied by x-ray tomography and finite element modeling—a review. *Journal of Materials Research*, 28(17), 2191-2201.
- [114] Maire, E., Caty, O., King, A., & Adrien, J. (2009). X ray tomography study of cellular materials: experiments and modelling. In *IUTAM Symposium on Mechanical Properties of Cellular Materials: Proceedings of the IUTAM Symposium on Mechanical Properties of*

- Cellular Materials, held September 17–20, 2007, LMT-Cachan, Cachan, France (pp. 35-42). Dordrecht: Springer Netherlands.
- [115] MATERIALOV, M. G. (2013). Microtomography in building materials. *Materiali in tehnologije*, 47(5), 661-664.
 - [116] 109, A. M. C. A. N. (2021). X-ray micro-computed tomography for heritage building materials. *Analytical Methods*, 13(48), 5875-5878.
 - [117] Brisard, S., Serdar, M., & Monteiro, P. J. (2020). Multiscale X-ray tomography of cementitious materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 128, 105824.
 - [118] Lima, M. G., & Jussiani, E. I. (2024). X-ray computed tomography for effective atomic number and density evaluation: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 225, 112130.
 - [119] Suerfu, B., & Tully, C. G. (2016). High resolution muon computed tomography at neutrino beam facilities. *Journal of Instrumentation*, 11(02), P02015-P02015.
 - [120] Kanno, I., Imamura, R., Yamashita, Y., Ohtaka, M., Hashimoto, M., Ara, K., & Onabe, H. (2014). Using energy-resolved X-ray computed tomography with a current mode detector to distinguish materials. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(5), 056601.
 - [121] VDI/VDE 2630 part 2.1. Computed Tomography in Dimensional Measurement - Determination of the Uncertainty of Measurement and Test Process Suitability of Coordinate Measurements Systems With CT Sensors, VDI, Dusseldorf.
 - [122] Hanke, R., Fuchs, T., Salamon, M., & Zabler, S. (2016). X-ray microtomography for materials characterization. In *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (pp. 45-79). Woodhead Publishing.
 - [123] Sietins, J. M., Green, W. H., & Jones, J. S. (2022). Material evaluation using X-ray computed tomography. *Comprehensive Structural Integrity*, 2nd Edition.
 - [124] Zubair, M., & Adel, Y. (2026). Advances in neutron imaging for non-destructive testing: Developing techniques, challenges, and future directions. *Kuwait Journal of Science*, 100546.
 - [125] Lehmann, E. H., Oberholzer, P., & Boillat, P. (2010). Neutron Imaging Methods for the Investigation of Energy Related Materials (Fuel Cells, Battery, Hydrogen Storage and Nuclear Fuel). *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1262, 1262-W05.
 - [126] Mannes, D., & Lehmann, E. H. (2022). Neutron imaging of cultural heritage objects. In *Handbook of Cultural Heritage Analysis* (pp. 211-237). Cham: Springer International Publishing.

- [127] Oksuz, I., Bisbee, M., Cherepy, N., Tringe, J., Townsend, A., Hall, J., & Cao, L. (2022, October). Comparison of thermal and fast neutron computed tomography of complex objects by additive manufacturing and electrical discharge machining. In *Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XXIV* (Vol. 12241, pp. 98-107). SPIE.
- [128] Wang, S., Tan, Z., Xiu, Q., Zhen, Z., Zhen, H., Yu, C., ... & Chen, J. (2023, January). Design of neutron and x-ray CT system in ERNI of CSNS. In *Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications 2022; and 2nd International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (AOMTA and YSAOM 2022)* (Vol. 12507, pp. 673-676). SPIE.
- [129] Schwarz, D., Vontobel, P., Lehmann, E. H., Meyer, C. A., & Bongartz, G. (2005). Neutron tomography of internal structures of vertebrate remains: a comparison with X-ray computed tomography. *Paleontol. Electron.* 8 (2), 30A, 11p.
- [130] Vontobel, P., Lehmann, E. H., Hassanein, R., & Frei, G. (2006). Neutron tomography: Method and applications. *Physica B: Condensed Matter*, 385, 475-480.
- [131] Strobl, M. (2024). Instruments and methods. In *Neutron Imaging: From applied materials science to industry* (pp. 19-1). Bristol, UK: IOP Publishing.
- [132] Joseph, B., & Nicolet, M. (2025). A systematic review on neutron radiography: applications, advantages, and challenges. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 56(1), 119.
- [133] 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.
- [134] 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.
- [135] ISO/ASTM 52900:2021, International Organization for Standardization & American Society for Testing and Materials. (2021). *Additive manufacturing — General principles — Terminology*.
- [136] Kim, H., Lin, Y., & Tseng, T. L. B. (2018). A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 645-669.
- [137] Al-Meslemi, Y., Ferreira, K., Mehdi-Souzani, C., Obaton, A. F., Nour, H., & Anwer, N. (2023). Quality control for additive manufacturing. In *Springer Handbook of Additive Manufacturing* (pp. 797-819). Cham: Springer International Publishing.

- [138] Sing, S. L., Goh, G. D., Goh, G. L., & Yeong, W. Y. (2023). Standards for metal additive manufacturing: Quality and quality control procedures. In *Quality analysis of additively manufactured metals* (pp. 3-24). Elsevier.
- [139] Seifi, M., Gorelik, M., Waller, J., Hrabe, N., Shamsaei, N., Daniewicz, S., & Lewandowski, J. J. (2017). Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification. *Jom*, 69(3), 439-455.
- [140] Du Plessis, A., Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., & Le Roux, S. G. (2018). X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(3), 227-247.
- [141] Sun, X., Huang, L., Xiao, B. G., Zhang, Q., Li, J. Q., Ding, Y. H., ... & Xie, H. M. (2025). X-ray computed tomography in metal additive manufacturing: A review on prevention, diagnostic, and prediction of failure. *Thin-Walled Structures*, 207, 112736.
- [142] Tran, T., & Zhang, X. (2022). Process monitoring and inspection. In *Digital Manufacturing* (pp. 387-442). Elsevier.
- [143] Yi, L., Shokrani, A., Bertolini, R., Mutilba, U., Guerra, M. G., Loukaides, E. G., & Woizeschke, P. (2022). Optical sensor-based process monitoring in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 115, 107-112.
- [144] Chua, C., Liu, Y., Williams, R. J., Chua, C. K., & Sing, S. L. (2024). In-process and post-process strategies for part quality assessment in metal powder bed fusion: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 73, 75-105.
- [145] Koester, L. W., Bond, L. J., Taheri, H., & Collins, P. C. (2019). Nondestructive evaluation of additively manufactured metallic parts: In situ and post deposition. *Additive manufacturing for the aerospace industry*, 401-417.
- [146] Fatoba, O. S., & Jen, T. C. (2023, May). Acoustic-based in-situ monitoring of additive manufacturing fabrication: A review. In *2023 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)* (pp. 250-256). IEEE.
- [147] Papatheodorou, A., Papadimitriou, N., Stathatos, E., Benardos, P., & Vosniakos, G. C. (2025). Recent advances in sensor fusion monitoring and control strategies in laser powder bed fusion: a review. *Machines*, 13(9), 820.
- [148] Khusheef, A. S., Shahbazi, M., & Hashemi, R. (2024). Deep learning-based multi-sensor fusion for process monitoring: application to fused deposition modeling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(8), 10501-10522.

- [149] Waheed, F., Höfig, K., & Reiß, F. (2025, September). AI-Driven Data Management Framework for Quality Assurance in Additive Manufacturing: A Case Study on the TRUMPF TruPrint 1000. In *International Symposium on Model-Based Safety and Assessment* (pp. 3-17). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [150] Perisic, M., Lu, Y., & Jones, A. (2022, August). In-Process Data Integration for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 86212, p. V002T02A074). American Society of Mechanical Engineers.
- [151] Pereira, A.G.; Barbosa, G.F.; Filho, M.G.; Shiki, S.B.; da Silva, A.L. Quality Control in Extrusion-Based Additive Manufacturing: A Review of Machine Learning Approaches. *IEEE Trans. Cybern.* 2025, 55, 2522–2534.
- [152] Koester, L. W., Bond, L. J., Collins, P. C., Taheri, H., & Bigelow, T. (2018). Nondestructive Evaluation of Additively Manufactured Metallic Parts. In *Nondestructive Evaluation of Materials* (pp. 544-552). ASM International.
- [153] Koester, L., Taheri, H., Bigelow, T., & Bond, L. (2018). Nondestructive testing for metal parts fabricated using powder based additive manufacturing. *Materials evaluation*, 76.
- [154] Qsymah, A., Younes, F. B., Ayasrah, M. M., & Alawneh, M. (2024, October). X-Ray Computed Tomography for Additive Manufacturing. In *International Conference on Optimization Driven Architectural Design* (pp. 251-260). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [155] Bitencourt, J., Osho, J., Harris, G., Purdy, G., & Moreira, A. C. (2023). Building Trust in Digital Twin through Verification and Validation. In *IISE Annual Conference. Proceedings* (pp. 1-6). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- [156] Krückemeier, S., & Schleich, B. (2024, June). Advancing digital twin-based virtual part inspection in additive manufacturing: systematic literature review of virtual inspection methods in FFF. In *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (pp. 379-389). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [157] Krückemeier, S., & Anderl, R. (2022). Concept for digital twin based virtual part inspection for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 107, 458-462.
- [158] Sundar, V., Snow, Z., Keist, J., Jones, G., Reed, R., & Reutzel, E. (2021). Flaw identification in additively manufactured parts using X-ray computed tomography and destructive serial sectioning. *Journal of materials engineering and performance*, 30(7), 4958-4964.

- [159] Du Plessis, A., le Roux, S. G., Els, J., Booysen, G., & Blaine, D. C. (2015). Application of microCT to the non-destructive testing of an additive manufactured titanium component. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 4, 1-7.
- [160] Romano, S., Abel, A., Gumpinger, J., Brandão, A. D., & Beretta, S. (2019). Quality control of AlSi10Mg produced by SLM: Metallography versus CT scans for critical defect size assessment. *Additive Manufacturing*, 28, 394-405.
- [161] Townsend, A. (2019). Optimizing X-ray Computed Tomography Settings for Dimensional Metrology Using 2D Image Analysis (No. LLNL-BOOK-811638). Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA (United States).
- [162] [Moroni, G., & Petró, S. (2019). Design for X-ray computed tomography. *Procedia CIRP*, 84, 173-178.
- [163] Venda, L., Malkawi, A., & Avagliano, A. (2020, May). Standardization of additive manufacturing for oil and gas applications. In *Offshore Technology Conference* (p. D031S042R005). OTC.
- [164] García-Domínguez, A., Claver, J., Camacho, A. M., & Sebastián, M. A. (2020). Analysis of general and specific standardization developments in additive manufacturing from a materials and technological approach. *Ieee Access*, 8, 125056-125075.
- [165] Obaton, A. F., Remacha, C., Marmin, S., Gay, L., & Ewert, U. (2026). New standard proposal to support the additive manufacturing industry: metrological inspection using XCT.
- [166] Broadbent, D. A., Gorman, D. M., Zeng, W., & Lou, S. (2025). Modular system of additive manufacturing benchmarking artefacts for XCT inspection using a design-for-metrology approach. *Precision Engineering*.
- [167] Kawalkar, R., Dubey, H. K., & Lokhande, S. P. (2022). A review for advancements in standardization for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1983-1990.
- [168] Tapia-Cabrera, J. E., Groschupp, F., Riegger, F., & Zaeh, M. F. (2025). AI-based monitoring system for real-time defect detection in wire arc additive manufacturing. *Journal of Advanced Joining Processes*, 100371.
- [169] Sani, A. R., Zolfagharian, A., & Kouzani, A. Z. (2024). Artificial intelligence-augmented additive manufacturing: insights on closed-loop 3D printing. *Advanced Intelligent Systems*, 6(10), 2400102.

- [170] Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. (2017). Finite element mesh coarsening for effective distortion prediction in wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 18, 145-155.
- [171] Huang, H., Chen, J., Carlson, B., Wang, H. P., Crooker, P., Frederick, G., & Feng, Z. (2018, July). Stress and distortion simulation of additive manufacturing process by high performance computing. In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 51678, p. V06AT06A009). American Society of Mechanical Engineers.
- [172] Neugebauer, F., Keller, N., Ploshikhin, V., Feuerhahn, F., & Köhler, H. (2014, April). Multi scale FEM simulation for distortion calculation in additive manufacturing of hardening stainless steel. In *International workshop on thermal forming and welding distortion*, Bremen, Germany.
- [173] Afazov, S., Denmark, W. A., Toralles, B. L., Holloway, A., & Yaghi, A. (2017). Distortion prediction and compensation in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 17, 15-22.
- [174] Xie, R., Chen, G., Zhao, Y., Zhang, S., Yan, W., Lin, X., & Shi, Q. (2019). In-situ observation and numerical simulation on the transient strain and distortion prediction during additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 494-501.
- [175] Mozaffar, M., Liao, S., Jeong, J., Xue, T., & Cao, J. (2023). Differentiable simulation for material thermal response design in additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 61, 103337.
- [176] Qin, M., Qu, S., Ding, J., Song, X., Gao, S., Wang, C. C., & Liao, W. H. (2023). Adaptive toolpath generation for distortion reduction in laser powder bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 64, 103432.
- [177] Zhang, W., Guo, D., Wang, L., Davies, C. M., Mirihanage, W., Tong, M., & Harrison, N. M. (2023). X-ray diffraction measurements and computational prediction of residual stress mitigation scanning strategies in powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 61, 103275.
- [178] 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.
- [179] Yaghi, A., Ayvar-Soberanis, S., Moturu, S., Bilkhu, R., & Afazov, S. (2019). Design against distortion for additive manufacturing. *Additive manufacturing*, 27, 224-235.
- [180] Verein Deutscher Ingenieure & Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. (2011). Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristics and their testing –

- Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors (VDI/VDE 2617 Blatt 13).
- [181] Vontobel Peter, Lehmann Eberhard, Frei Gabriel. Performance characteristics of the tomography setup at the PSI NEUTRA thermal neutron radiography facility. In: Proceedings of Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology; 2003:23–25.
 - [182] Zemek, M., Blažek, P., Šrámek, J., Šalplachta, J., Zikmund, T., Klapetek, P., ... & Kaiser, J. (2020, February). Voxel size calibration for high-resolution CT. In 10th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) (p. 8).
 - [183] Leonard, F., Brown, S. B., Withers, P. J., Mummery, P. M., & McCarthy, M. B. (2014). A new method of performance verification for x-ray computed tomography measurements. *Measurement Science and Technology*, 25(6), 065401.
 - [184] DIN5401:2002–08 2002 RollingBearings—Balls forRollingBearings andGeneral Industrial Use (Deutsches Institut für Normung)
 - [185] Butzhammer, L., Müller, A. M., & Hausotte, T. (2023). Calibration of 3D scan trajectories for an industrial computed tomography setup with 6-DOF object manipulator system using a single sphere. *Measurement Science and Technology*, 34(1), 015403.
 - [186] <https://webapps.frm2.tum.de/activation/> [Utolsó hozzáférés: 2023.02.10.].
 - [187] Karolewska, K., Ligaj, B., Wirwicki, M., & Szala, G. (2020). Strength analysis of Ti6Al4V titanium alloy produced by the use of additive manufacturing method under static load conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1365-1379.
 - [188] ISO 10360-2. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions. 2009, Standard.
 - [189] Metrology CZI. ZEISS PRISMO – High-Performance Bridge-Type CMM. 2025, <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/cmms/bridge-type-cmms/prismo-family/zeiss-prismo.html>. [Utolsó hozzáférés: 2025.07.05.].
 - [190] Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristics and their testing – Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI); 2011, p. 35, VDI/VDE 2617 Part 13. German/English edition.
 - [191] Technologies W. v|tome|x m – High-Resolution Industrial CT System for Precision Metrology. 2025, <https://www.bakerhughes.com/waygate-technologies/industrial->

- radiography-and-ct/industrial-3d-precision-metrology-ct/vtomex-m. [Utolsó hozzáférés: 2025.07.05.].
- [192] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, b. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM GUM-6:2020.
- [193] VDA Part 5, 2021. Measurement and testing processes, suitability, planning and management. Guideline.
- [194] VDI/VDE 2630 Part 1.3, 2011. Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT sensors. Guideline.
- [195] VDI/VDE 2630 Part 2.1, 2015. Determination of the uncertainty of measurement and the test process suitability of coordinate measurement systems with CT sensors. Guideline.
- [196] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. 10.59161/JCGM100-2008E. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008.
- [197] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. International Vocabulary of Metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). 10.59161/JCGM200-2012. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 200:2012. (3rd edition).
- [198] Villarraga-Gómez, H., Thousand, J. D., & Smith, S. T. (2020). Empirical approaches to uncertainty analysis of X-ray computed tomography measurements: A review with examples. *Precision Engineering*, 64, 249-268.
- [199] Synek, V. (2005). Attempts to include uncorrected bias in the measurement uncertainty. *Talanta*, 65(4), 829-837.
- [200] Villarraga-Gómez, H. (2018). Studies of dimensional metrology with X-ray CAT scan (Doctoral dissertation, The University of North Carolina at Charlotte).
- [201] Villarraga-Gómez, H., & Smith, S. T. (2019, February). Uncertainty for uncorrected measurement results in X-ray computed tomography. In 9th International Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2019).
- [202] Phillips, S. D., Eberhardt, K. R., & Parry, B. (1997). Guidelines for expressing the uncertainty of measurement results containing uncorrected bias. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 102(5), 577.
- [203] VDA Part 5. Measurement and testing processes, suitability, planning and management. 2021, Guideline.

- [204] Frenkel, R., Farrance, I., & Badrick, T. (2019). Bias in analytical chemistry: a review of selected procedures for incorporating uncorrected bias into the expanded uncertainty of analytical measurements and a graphical method for evaluating the concordance of reference and test procedures. *Clinica chimica acta*, 495, 129-138.
- [205] ISO 13528. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. 2022, Standard.
- [206] ISO/IEC 17043. Conformity assessment - general requirements for the competence of proficiency testing providers. 2023, Standard.
- [207] Villarraga-Gómez, H., Hocken, R., Morse, E., & Smith, S. (2014, April). Proficiency testing for interlaboratory comparisons on industrial computed tomography. In 2014 Spring Topical Meeting-Proc ASPE Volume (Vol. 57).
- [208] Krüger, J., Köning, R., & Bodermann, B. (2019, June). Systematic approach on illustrating the challenges represented by optical bidirectional measurements using rigorous simulations. In *Modeling Aspects in Optical Metrology VII* (Vol. 11057, pp. 56-64). SPIE.
- [209] Drégelyi-Kiss, Á. (2024). Application of experimental design-based predictive models and optimization in additive manufacturing—a review. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 52(1), 55-70.
- [210] Sheskin, D. J. (2003). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Chapman and hall/CRC.
- [211] The jamovi project, Jamovi, 2022 [Computer Software], Version 2.3. <https://www.jamovi.org>. [Utolsó hozzáférés: 2023.10.19.].
- [212] **Marczis, A.**, Kis, Z., & Dregelyi-Kiss, A. (2026). Metrological characterisation of neutron and X-ray computed tomography. *Precision Engineering*, 99, 575-592.
- [213] **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.
- [214] Drégelyi-Kiss, A., & **Marczis, A.** (2025). Air Gap Effects on Dimensional Accuracy in Multi-Material X-ray CT Measurements. *Results in Engineering*, 108408.
- [215] **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.

- [216] **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.
- [217] **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.
- [218] 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.
- [219] **Marczis, A.**, & Drégelyi-Kiss, Á. (2025). Dimensional and geometrical characterization of plastic powder bed fusion parts through computed tomography. *Measurement: Sensors*, 38, 101843.

9 Rövidítésjegyzék

3D - Háromdimenziós (Three-dimensional)

AM - Additív gyártás (Additive Manufacturing)

ANOVA - Varianciaanalízis (Analysis of Variance)

ASME - Amerikai Gépészmérnökök Társasága (American Society of Mechanical Engineers)

BJT - Kötőanyag-sugaras (Binder Jetting)

CAD - Számítógéppel segített tervezés (Computer-Aided Design)

CADc - Kompenzált CAD modell (Compensated CAD model)

CADn - Névleges CAD modell (Nominal CAD model)

CER - Energiatudományi Kutatóközpont (Centre for Energy Research)

CFRP - Szénszál-erősítésű polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

CLTE - Lineáris hőtágulási együttható (Coefficient of Linear Thermal Expansion)

CMM - Koordináta-mérőgép (Coordinate-Measuring Machine)

CNR - Kontraszt-zaj viszony (Contrast-to-Noise Ratio)

CT - Számítógépes tomográfia (Computed Tomography)

DED - Irányított energiabevitelű leválasztás (Directed Energy Deposition)

FDM - Olvasztott réteglekötéses modellezés (Fused Deposition Modeling)

FDK - Feldkamp-Davis-Kress algoritmus (Feldkamp-Davis-Kress algorithm)

FEM - Végeselemes modellezés (Finite Element Modeling)

FOD - Fókusz-objektum távolság (Focus-Object Distance)

FDD - Fókusz-detektor távolság (Focus-Detector Distance)

GD&T - Geometriai méretezés és tűrésezés (Geometric Dimensioning and Tolerancing)

GPS - Geometriai termékspecifikáció (Geometrical Product Specification)

ISO - Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (International Organization for Standardization)

- ME - Mérési hiba (Measurement Error)
- MEX - Anyagextrudálás (Material Extrusion)
- MJT - Anyagsugaras (Material Jetting)
- MM - Többanyagú (Multi-Material)
- MPE - Maximálisan megengedett hiba (Maximum Permissible Error)
- NCT - Neutrontomográfia (Neutron Computed Tomography)
- NDT - Roncsolásmentes anyagvizsgálat (Non-Destructive Testing)
- NURBS - Nem egyenközű racionális B-szplájn (Non-uniform rational B-spline)
- PA12 - Poliamid 12 (Polyamide 12)
- PBF - Porágyas olvasztás (Powder Bed Fusion)
- PEEK - Poliéter-éter-keton (Polyether ether ketone)
- POM - Polioximetilén (Polyoxymethylene)
- RME - Relatív mérési hiba (Relative Measurement Error)
- RSS - Négyzetes összegzés (Root Sum Square)
- SHL - Réteglaminálás (Sheet Lamination)
- SLM - Szelektív lézerolvasztás (Selective Laser Melting)
- SLS - Szelektív lézeres szinterezés (Selective Laser Sintering)
- SM - Egyanyagú (Single-Material)
- SNR - Jel-zaj viszony (Signal-to-Noise Ratio)
- STL - Standard Tessellation Language / Standard Triangle Language (3D modellek leírására szolgáló fájlformátum)
- VIM - Nemzetközi Metrológiai Szótár (International Vocabulary of Metrology)
- VPP – Fotopolimerizációs eljárás (Vat Photopolymerization)
- XCT - Röntgentomográfia (X-ray Computed Tomography)

10 Mellékletek

1. Melléklet: a cirkónium alapú gömbökben a CER neutronforrása által keletkező izotópoknak a felezési ideje és aktivitása a szimuláció szerint

Izotóp	Bomlási termék	Felezési idő	Idő mértékegysége	Határérték [Bq]	Aktivitás 0 m [Bq]	Aktivitás 1 h [Bq]	Aktivitás 24 h [Bq]	Aktivitás 14 d [Bq]
O-16	N-16	7,14	[s]		385,56	0,00	0,00	0,00
O-16	O-15	122,00	[s]	1,00E+09	0,01	0,00	0,00	0,00
O-17	N-17	4,17	[s]		0,06	0,00	0,00	0,00
O-18	O-19	27,10	[s]		0,18	0,00	0,00	0,00
Y-89	Rb-86	18,70	[d]	1,00E+05	0,04	0,04	0,04	0,02
Y-89	Sr-89	50,50	[d]	1,00E+06	2,36	2,36	2,33	1,95
Y-89	Y-88	106,61	[d]	1,00E+06	0,57	0,57	0,56	0,52
Y-89	Y-89m	15,70	[s]		7,16E+04	0,00	0,00	0,00
Y-89	Y-90	64,10	[h]	1,00E+05	4,91E+03	4,86E+03	3,79E+03	1,30E+02
Y-89	Y-90m+	3,19	[h]		16,69	13,43	0,09	0,00
Zr-90	Y-90	64,10	[h]	1,00E+05	209,23	206,98	161,40	5,53
Zr-90	Zr-89	78,40	[h]		73,89	73,24	59,76	3,79
Zr-92	Sr-89	50,50	[d]	1,00E+06	0,32	0,32	0,31	0,26
Zr-94	Zr-95s	64,00	[d]	1,00E+06	26,52	26,51	26,24	22,79
Zr-96	Zr-97s	16,80	[h]	1,00E+05	112,51	107,97	41,80	0,00
Dózis [μ Sv/h]					0,00	0,00	0,00	0,00

2. Melléklet: a Ti6Al4V ötvözetből készült alkatrészekben a CER neutronforrása által keletkező izotópoknak a felezési ideje és aktivitása a szimuláció szerint

Izotóp	Bomlási termék	Felezési idő	Idő mértékegysége	Határérték [Bq]	Aktivitás 0 m [Bq]	Aktivitás 1 h [Bq]	Aktivitás 24 h [Bq]	Aktivitás 14 d [Bq]
Al-27	Al-28	2,246	[m]		1,12E+06	0,01	0	0
Al-27	Mg-27	9,458	[m]		6,45E+05	7,94E+03	0	0
Al-27	Na-24	15,03	[h]	1,00E+05	7,82E+04	7,47E+04	2,59E+04	0,01
Fe-54	Cr-51	27,7	[d]	1,00E+07	3,42	3,42	3,34	2,41
Fe-54	Fe-53	8,51	[m]		1,15	0,01	0,00	0,00
Fe-54	Fe-55	2,7	[y]	1,00E+06	10,95	10,95	10,94	10,85
Fe-54	Mn-54	321,7	[d]	1,00E+06	41,75	41,74	41,66	40,47
Fe-56	Mn-56	2,58	[h]	1,00E+05	3,73E+03	2,85E+03	5,91	0,00
Fe-58	Fe-59	44,6	[d]	1,00E+06	6,14	6,13	6,04	4,94
N-15	N-16	7,14	[s]		0,01	0,00	0,00	0,00
O-16	N-16	7,14	[s]		168,38	0,00	0,00	0,00
O-17	N-17	4,17	[s]		0,03	0,00	0,00	0,00
O-18	O-19	27,1	[s]		0,08	0,00	0,00	0,00
Ti-46	Sc-46	84	[d]	1,00E+06	1,10E+04	1,10E+04	1,09E+04	9,83E+03
Ti-46	Ti-45	3,078	[h]		883,19	705,10	3,97	0,00
Ti-47	Sc-47	3,422	[d]	1,00E+06	3,31E+05	3,29E+05	2,71E+05	1,94E+04
Ti-48	Ca-45	165	[d]	1,00E+07	53,08	53,07	52,86	50,05
Ti-48	Sc-48	43,67	[h]	1,00E+05	1,22E+05	1,21E+05	8,37E+04	591,52
Ti-50	Ca-47*	4,54	[d]	1,00E+06	4,28	4,25	3,67	0,50
Ti-50	Ti-51	5,8	[m]		3,53E+05	271,30	0,00	0,00
V-51	Sc-48	43,67	[h]	1,00E+05	387,50	381,39	264,75	1,87
V-51	Ti-51	5,76	[m]		4,84E+04	35,39	0,00	0,00
V-51	V-52	3,75	[m]		8,22E+06	125,48	0,00	0,00
Dózis [μ Sv/h]					1,45	0,42	0,24	0,01

3. Melléklet: a kalibrációs fantom mérési hibái, standard bizonytalansági tényezői és a torzítás nélküli kiterjesztett mérési bizonytalansága a CT rendszerek mérési eredményeiből számolva

Mérőgép	Jellemző	Mérési hiba [mm]	$u(\delta_{cal})$ [μm] $u(x_2)$ [μm]	$u(\delta_{rep})$ [μm] $u(x_3)$ [μm]	$u(\delta_{17})$ [μm] $u(x_5)$ [μm]	U_0 [mm]
XCT1	DST1	0,022	0,56	10,52	0,20	0,021
XCT1	DST2	0,022	0,59	20,84	0,40	0,042
XCT1	DST3	0,001	0,55	10,32	0,20	0,021
XCT1	DIA1	-0,002	0,53	3,40	0,07	0,007
XCT1	DIA2	-0,005	0,53	3,40	0,07	0,007
XCT1	DIA3	-0,009	0,53	3,40	0,07	0,007
XCT2	DST1	-0,020	0,56	0,13	0,20	0,001
XCT2	DST2	-0,039	0,59	0,26	0,40	0,002
XCT2	DST3	-0,019	0,55	0,13	0,20	0,001
XCT2	DIA1	-0,011	0,53	0,93	0,07	0,001
XCT2	DIA2	-0,010	0,53	0,93	0,07	0,001
XCT2	DIA3	-0,012	0,53	0,93	0,07	0,001
XCT3	DST1	-0,004	0,56	0,08	0,20	0,001
XCT3	DST2	-0,008	0,59	0,15	0,40	0,001
XCT3	DST3	-0,004	0,55	0,07	0,20	0,001
XCT3	DIA1	-0,006	0,53	2,28	0,07	0,005
XCT3	DIA2	-0,002	0,53	2,28	0,07	0,005
XCT3	DIA3	-0,002	0,53	2,28	0,07	0,005
NCT	DST1	0,012	0,56	38,27	0,20	0,077
NCT	DST2	-0,052	0,59	75,79	0,40	0,152
NCT	DST3	-0,064	0,55	37,52	0,20	0,075
NCT	DIA1	-0,003	0,53	12,70	0,07	0,025
NCT	DIA2	-0,015	0,53	12,70	0,07	0,025
NCT	DIA3	-0,029	0,53	12,70	0,07	0,025

4. Melléklet: a vizsgálati darab síklaptávolságainak a mérési hibája, kiterjesztett mérési bizonytalansága torzítás nélkül (U_0), valamint a torzítást figyelembe vevő mérési bizonytalanságok a különböző módszerekkel (U_{RSSu} , U_{RSSU} , $U_{SUMUmax}$ és U_{VDA5})

Mérőgép	Jellemző	Mérési hiba [mm]	U_0 [mm]	U_{RSSu} [mm]	U_{RSSU} [mm]	$U_{SUMUmax}$ [mm]	U_{VDA5} [mm]
XCT1	L1	-0,004	0,030	0,046	0,035	0,046	0,039
XCT1	L2	0,007	0,030	0,046	0,035	0,046	0,039
XCT1	L3	-0,002	0,030	0,046	0,035	0,046	0,039
XCT1	L4	0,036	0,030	0,046	0,035	0,046	0,039
XCT1	L5	-0,008	0,030	0,046	0,035	0,046	0,039
XCT1	L6	0,006	0,030	0,046	0,035	0,046	0,039
XCT2	L1	-0,004	0,001	0,055	0,027	0,029	0,045
XCT2	L2	-0,008	0,001	0,055	0,027	0,029	0,045
XCT2	L3	-0,021	0,001	0,055	0,027	0,029	0,045
XCT2	L4	0,016	0,001	0,055	0,027	0,029	0,045
XCT2	L5	-0,011	0,001	0,055	0,027	0,029	0,045
XCT2	L6	0,003	0,001	0,055	0,027	0,029	0,045
XCT3	L1	0,001	0,001	0,011	0,006	0,007	0,009
XCT3	L2	0,008	0,001	0,011	0,006	0,007	0,009
XCT3	L3	0,001	0,001	0,011	0,006	0,007	0,009
XCT3	L4	0,026	0,001	0,011	0,006	0,007	0,009
XCT3	L5	-0,004	0,001	0,011	0,006	0,007	0,009
XCT3	L6	0,011	0,001	0,011	0,006	0,007	0,009
NCT	L1	0,034	0,107	0,107	0,117	0,151	0,130
NCT	L2	0,007	0,107	0,107	0,117	0,151	0,130
NCT	L3	-0,010	0,107	0,107	0,117	0,151	0,130
NCT	L4	0,038	0,107	0,107	0,117	0,151	0,130
NCT	L5	-0,028	0,107	0,107	0,117	0,151	0,130
NCT	L6	0,002	0,107	0,107	0,117	0,151	0,130

5. Melléklet: az alumínium darab MM esetben mért eredményeinek az átlaga, mediánja és szórása a pixelegyesítés és expozíciós idő, a névleges méret és a szegmens szerint csoportosítva

Pixelegyesítés / expozíciós idő [-/ms]	Névleges méret [mm]	Szegmens	N	Átlag [mm]	Medián [mm]	Szórás [mm]
1x1/250	15	1	12	0,0265	0,0254	0,0033
1x1/250	15	2	12	0,0659	0,0666	0,0026
1x1/250	15	3	12	0,0871	0,0870	0,0031
1x1/250	15	4	12	0,0919	0,0925	0,0046
1x1/250	15	5	12	0,0878	0,0888	0,0056
1x1/250	15	6	12	0,0837	0,0838	0,0057
1x1/250	15	7	12	0,0378	0,0379	0,0025
1x1/250	20	1	12	0,0179	0,0160	0,0042
1x1/250	20	2	12	0,0591	0,0594	0,0028
1x1/250	20	3	12	0,0831	0,0832	0,0027
1x1/250	20	4	12	0,0919	0,0923	0,0041
1x1/250	20	5	12	0,0900	0,0907	0,0051
1x1/250	20	6	12	0,0864	0,0863	0,0058
1x1/250	20	7	12	0,0234	0,0218	0,0039
2x2/120	15	1	12	-0,0091	-0,0088	0,0084
2x2/120	15	2	12	0,0702	0,0705	0,0034
2x2/120	15	3	12	0,1057	0,1060	0,0020
2x2/120	15	4	12	0,1294	0,1293	0,0015
2x2/120	15	5	12	0,1396	0,1397	0,0025
2x2/120	15	6	12	0,1438	0,1446	0,0035
2x2/120	15	7	12	0,0354	0,0344	0,0048
2x2/120	20	1	12	-0,0055	-0,0098	0,0115
2x2/120	20	2	12	0,0585	0,0592	0,0038
2x2/120	20	3	12	0,0967	0,0965	0,0033
2x2/120	20	4	12	0,1219	0,1209	0,0025
2x2/120	20	5	12	0,1361	0,1354	0,0043
2x2/120	20	6	12	0,1418	0,1412	0,0046
2x2/120	20	7	12	0,0202	0,0209	0,0030

6. Melléklet: a POM csak MM esetben mért eredményeinek az átlaga, mediánja és szórása a pixelegyesítés és expozíciós idő, a névleges méret és a szegmens szerint csoportosítva

Pixelegyesítés / expozíciós idő [-/ms]	Névleges méret [mm]	Szegmens	N	Átlag [mm]	Medián [mm]	Szórás [mm]
1x1/250	15	1	12	0,0542	0,0545	0,0035
1x1/250	15	2	12	0,1456	0,1465	0,0043
1x1/250	15	3	12	0,2156	0,2164	0,0046
1x1/250	15	4	12	0,2713	0,2710	0,0047
1x1/250	15	5	12	0,3118	0,3126	0,0061
1x1/250	15	6	12	0,3408	0,3410	0,0066
1x1/250	15	7	12	0,0764	0,0756	0,0043
1x1/250	20	1	12	0,0360	0,0346	0,0057
1x1/250	20	2	12	0,1297	0,1295	0,0037
1x1/250	20	3	12	0,2008	0,2015	0,0040
1x1/250	20	4	12	0,2581	0,2577	0,0050
1x1/250	20	5	12	0,2994	0,2995	0,0055
1x1/250	20	6	12	0,3285	0,3279	0,0066
1x1/250	20	7	12	0,0483	0,0454	0,0055
2x2/120	15	1	12	0,0470	0,0470	0,0048
2x2/120	15	2	12	0,1511	0,1500	0,0052
2x2/120	15	3	12	0,2362	0,2375	0,0029
2x2/120	15	4	12	0,3164	0,3166	0,0037
2x2/120	15	5	12	0,3764	0,3758	0,0049
2x2/120	15	6	12	0,4142	0,4148	0,0065
2x2/120	15	7	12	0,0756	0,0737	0,0068
2x2/120	20	1	12	0,0303	0,0278	0,0091
2x2/120	20	2	12	0,1298	0,1282	0,0052
2x2/120	20	3	12	0,2181	0,2173	0,0039
2x2/120	20	4	12	0,2975	0,2967	0,0032
2x2/120	20	5	12	0,3605	0,3612	0,0056
2x2/120	20	6	12	0,4018	0,4019	0,0072
2x2/120	20	7	12	0,0459	0,0463	0,0037

11 Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek, dr. Drégelyi-Kiss Ágotának, akinek szakmai iránymutatása, tanácsai és folyamatos biztatása nélkülözhetetlen volt a disszertáció elkészítése során. Támogatása és a kutatásba vetett hite mindvégig erőt adott a munkához.

A kutatás gyakorlati megvalósításában nyújtott segítségükért külön köszönettel tartozom több szakembernek. Hálás vagyok dr. Kis Zoltánnak a neutronos mérésekben, és dr. Odrobina Miklósnak a 3D nyomtatásokban való közreműködéséért. Köszönöm továbbá az Elas Kft. munkatársainak, Szántó Balázsnak és Tamás Gábornak a kiértékelések során nyújtott felbecsülhetetlen szakmai támogatást, valamint Mohai Tamásnak (Werth Magyarország Kft.) a mérések kivitelezéséhez nyújtott odaadó segítségét.

Legnagyobb köszönetem pedig a családomat illeti: feleségemet és gyermekeimet, akik türelmükkel és szeretetükkel biztosították a nyugodt háttérrel a kutatómunkához, és mindvégig mellettem álltak a doktori tanulmányaimra fordított évek alatt.