

# **Vaszkuláris rendszerek modellezése**

Ph.D. értekezés tézisei

**Kákonyi Róbert**

Témavezetők:

**Dr. Erdélyi Miklós**  
egyetemi adjunktus

**Dr. Szabó Gábor**  
egyetemi tanár

Fizika Doktori Iskola  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

SZTE TTIK

Szeged  
2010

## I. Tudományos előzmények

A röntgensugarak felfedezése óta eltelt 115 évben a keltésükre használt eszközök technikai kivitele jelentősen fejlődött, de az orvosi képalkotás területén napjainkban is használatos röntgensövekben a röntgensugarak létrehozására alkalmazott fizikai jelenség megegyezik a röntgensugarak felfedezésekor vizsgált jelenséggel. Nevezetesen, egy légritkított térben elhelyezett fémelektród felületébe gyorsított elektronok nyalábját ütköztetve, abból röntgensugárzás lép ki.

A technikai fejlesztés iránya a fókuszolt méretének csökkentése, az anód termális terhelhetőségének növelése és a maximális áram növelésének irányába mutat. A modern röntgensövekben anóanyagként wolframot és ötvözeteit használják, míg mammográfiai csövek esetén molibdént és réniomot a kezdetben alkalmazott platina helyett. A maximális csőáram jelentős növelését a forgóanód bevezetése tette lehetővé, amelynek alkalmazásával nagyobb felületen oszlik el az anódot terhelő hő. A röntgenkészülékek további fejlesztése egyre pontosabb modellezést igényel.

A képalkotás során szerepet játszó fizikai jelenségek általában három szerkezeti kategóriába sorolhatóak: a sugárforrás, a vizsgálni kívánt objektum és a detektor. Mind a három kategóriában szereplő jelenségek tulajdonságai jelentősen függenek a képalkotáshoz használt röntgensugárzás fotonenergiájától vagy spektrumától. Alkalmazástól függően ezen energiafüggés lehet hátrányos, például CT-k (számítógépes tomográfok, computer tomograph) esetén a nyalábkeményedés jelensége, illetve előnyös, amikor ezen energiafüggést felhasználva szerzünk további információt a vizsgálni kívánt objektumról, például a duál-energiás anyagszétválasztás esetén. Mindkét esetben jelentős hatással van a sugárforrás spektruma a vizsgálni kívánt objektum paramétereinek becslésére, annak ismerete pedig a becslés pontosságára.

Dolgozatomban áttekintettem az orvosi képalkotásban használt röntgensövek spektrumának számítására alkotott eddigi modelleket. A röntgenső anódjából kilépő röntgensugárzás modellezésére tett kísérleteket az alkalmazott módszerek szerint több kategóriába sorolhatjuk: 1. empirikus, 2. szemi-empirikus, 3. Monte Carlo.

Az empirikus és szemi-empirikus módszerek esetén egy, a fizikai jelenségek tulajdonságainak felhasználásával szerkesztett matematikai formula paramétereit illesztjük mérési adatokra. Ekkor a modellünk prediktív képességeit az empirikus formula levezetése során figyelembevett jelenségek és közelítések fogják limitálni. Ezen megszorítások ellenére

empirikus és szemi-empirikus módszerekkel jól becsülhetőek az anódból kilépő röntgensugárzás paraméterei.

A számítási kapacitások bővülésével Monte Carlo szimulációval reális számítási időn belül kaphatunk nagy felbontású eredményeket az anódból kilépő röntgensugárzás spektrumára vonatkozóan. A Monte Carlo módszer előnye, hogy a fotonok és az elektronok transzportjában fellépő összes jelenséget és azok egymáshoz csatoltságát (pl. egy elektron kelt egy másik elektront vagy fotont, majd a keltett részecske egy újabb elektront vagy fotont, és így tovább) könnyen és nagy pontossággal figyelembe tudjuk venni. Hátránya viszont annak statisztikai mivolta, azaz ha a szimuláció eredményének bizonytalanságát a felére akarjuk csökkenteni vagy a számolt spektrum energiefelbontását adott bizonytalanság mellett a kétszeresére növelni, akkor a szimuláció futási ideje a négyszeresére nő. Ezen korlátot a napjainkban elérhető számítási kapacitások jelentősen csökkentik.

Empirikus modellekkel végzett korábbi kutatások eredményei alapján ismeretes, hogy az anódfelületből kilépő röntgensugárzás tulajdonságaira gyakorlati szempontból is jelentős hatással van az anód felületének struktúrája. Egyes szabadalmak javasolják az anód felületének szándékos módosítását annak termális tulajdonságainak javítása érdekében.

## **II. Célkitűzések**

Jelen disszertáció a GE Healthcare és a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéke közötti együttműködés során keletkezett. Együttműködésünk egyik célja az XTOP (X-ray Technique Optimization Platform) szimulációs eszközben alkalmazott fizikai modellek továbbfejlesztése. A mérnöki munka során az XTOP szimulációs eszköz segítségével végzik az Innova típusú készülékek vezérlésének optimalizációját, így annak pontossága explicit összefüggésben áll a beállítás-tervezés ellenőrzésére szánt idővel és a felhasznált emberi erőforrással.

Általános céloom az egyes képalkotási paraméterek számítási pontosságának növelése és a megfelelő kalibrációs technikák kidolgozása. Az együttműködés ütemezéséből és az ésszerűségből fakadóan a szimulációs eszköz fejlesztéséhez először a röntgenforrást leíró modellt és a hozzá kapcsolódó fejlesztési lehetőségeket fogom megvizsgálni. Az XTOP jelenleg az IPeM (Institute of Physics and Engineering in Medicine) táblázatot használja az anódszög irányában kilépő röntgensugárzás spektrumának leírására. Az IPeM táblázat a BM (Birch and Marshall) modell paramétereinek kísérleti adatokra való illesztésén alapul. A táblázat a 30 - 150 kVp csőfeszültség-tartományt fedi le 1 kVp lépésekben és kb. a 6-22°

kilépésszög-tartományt kb.  $1^\circ$ -os lépésekben. Mivel az Innova rendszerekben a flat panel detektor a kb.  $2-24^\circ$  kilépésszög-tartományt fedi le, így az IPEM táblázat elégtelen ahhoz, hogy a teljes Innova rendszer Monte Carlo szimulációja során olyan fotonforrást tudjak majd definiálni, amely lefedi a szükséges kilépésszög-tartományt. Továbbá a BM modell empirikus formulájának levezetéséből látszik, hogy elhanyagolja a fékezési sugárzás anizotrópiáját. Ezen okok miatt egy teljesen új spektrumtáblázat készítését fogom elvégezni.

Az irodalomból ismeretes, hogy a felületi érdesség hatással van a fókuszfoltból kilépő röntgensugárzás spektrumának tulajdonságaira, illetve a különböző gyártók által készített röntgensövek öregedési tulajdonságai eltérőek lehetnek. Ezért meg fogom vizsgálni az Innova típusú készülékekben is használt Maxiray 150 típusú röntgensövek anódfelületének tulajdonságait.

A vizsgálatok eredményét és az irodalomból származó anódfelület-profilokat felhasználva Monte Carlo szimulációkat fogok végezni a felületi érdesség hatásának vizsgálatára. A végső céлом spektrumtáblázatok készítése a felhasznált profilokhoz, amelyeket később a teljes rendszer további szimulációinak elvégzéséhez fogok majd felhasználni.

### **III. Mérési és szimulációs módszerek**

Az Innova típusú röntgenkészülékekben használt Maxiray 150 típusú röntgensövek anódfelületei optikai mikroszkóppal, profilométerrel és pásztázó elektronmikroszkóppal lettek megvizsgálva. Ezen vizsgálatokból és az irodalomból származó profiladatokat használtam a további számításaim során.

A szimulációk elvégzéséhez az MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) nevű Monte Carlo részecsketranszport kódot használtam, amely az orvosi képalkotó berendezések szimulációjában igen elterjedt és gyakran használt eszköz. Szimulációim során a fotonok fluxusát vizsgáltam különböző geometriai elrendezésekben. A fluxus számolásához úgynevezett pontdetektorokat (point detector) használtam.

Szimulációim során két különböző geometriával számoltam. Az első geometria segítségével határoztam meg a fókuszfoltból kilépő fotonok fluxusának irány és energia szerinti eloszlását nagy felbontással. A második geometria az Innova 3100 típusú készülék egy egyszerűsített modellje volt.

## IV. Eredmények

Értekezésemben a wolfram anódú röntgensövek fókuszoltjából kilépő röntgensugárzás tulajdonságait vizsgáltam Monte Carlo szimuláció segítségével. Eredményeimet az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. A felületi érdesség leírására egy egyszerű modellt alkottam, amely 19 darab Maxiray 150 típusú röntgenső kísérleti elemzésén alapult. A felület tipikusan  $\sim 100 \mu\text{m}$  méretű szigetekből áll, amelyeket átlagosan  $8 \mu\text{m}$  mély repedések választanak el egymástól. Ezen repedések tipikus szélessége néhány  $\mu\text{m}$  volt, de elérhette a  $20 \mu\text{m}$ -t is. Az egyes szigetek felületei homogének és izotrópok voltak. A szigetek felületének felületi érdessége nem haladta meg az  $1 \mu\text{m}$ -t. Ezen eredményeket felhasználva egy egydimenziós felületmodellt készítettem, amelyben egy ideális síkfelületbe  $8 \mu\text{m}$  mély repedéseket ültettem  $150 \mu\text{m}$ -es periódussal. A repedések szélességét a felületi érdességnek megfelelően választottam meg.
2. Monte Carlo szimuláció segítségével nagy energia és szög szerinti (rendre  $0,5 \text{ keV}$  és  $1^\circ$ ) felbontással megvizsgáltam az ideális sík anódfelületből kilépő röntgensugárzás fluxusát. Arra a megállapításra jutottam, hogy az eddigi irodalmi ismeretekkel szemben az egyes spektrális komponenseknek határozott maximumuk van a kilépési szög függvényében. A maximum kilépésszög-pozíciója erősen függ a fotonenergiától, és nem analitikus függvény. Kísérletileg igazoltam az effektus létezését.
3. Monte Carlo szimuláció segítségével nagy energia és szög szerinti (rendre  $0,5 \text{ keV}$  és  $1^\circ$ ) felbontással megvizsgáltam különböző profilú anódfelületekről kilépő röntgensugárzások fluxusait. Az irodalomban eddig a felületi érdesség hatását az anód anyagából készült szűrő segítségével próbálták leírni. Összehasonlítva az érdes anódfelületek és az anód anyagából készült szűrő hatását a spektrumra, megmutattam, hogy ezen egyszerűsítés erősen paraméterfüggő hibát okoz.
4. Megállapítottam, hogy a felületi érdesség jelentős hatással van a spektrális fotonfluxus kilépésszög-függésére. A felületi érdesség növelésével a spektrális fotonfluxus maximumának pozíciója a nagyobb kilépési szögek felé tolódik el. Kb.  $55 \mu\text{m}$  felületi érdesség felett a spektrális fotonfluxus maximuma minden energiatartományban a  $90^\circ$  értéket veszi fel, azaz a spektrális fluxus monoton módon növekszik a kilépési szög függvényében.

5. Megvizsgáltam a fontosabb nyalábtulajdonságokat leíró fizikai mennyiségeket a kilépési szög és a felületi érdesség függvényében. Arra a következtetésre jutottam, hogy a felületi érdesség felhasználható a nyaláb tulajdonságainak alkalmas módosítására. Ilyen fontos paraméter lehet a nyalábkeménység kilépési szögtől való függésének alkalmas megválasztása. Növelve a felületi érdességet, a nyaláb keménységét leíró HVL (half value layer) paraméter kilépési szögtől való függése jelentősen csökken, míg a nyaláb intenzitásának kilépési szögtől való függése nő. Megállapítottam továbbá, hogy adott szűrés és csőfeszültség mellett létezik egy olyan kilépésszög-tartomány, ahol a nyaláb keménységét leíró paraméter nem függ a felületi érdességtől.
6. Megállapítottam, hogy az  $R_a$  felületi érdesség, mint fizikai mennyiség önmagában nem alkalmas a felületi érdességnek a keltett röntgennyalábra gyakorolt hatása leírására. Kisebb kilépési szögeknél ( $< \sim 6^\circ$ ) és csőfeszültségnél ( $< 60$  kVp) a spektrumok felületi érdesség és spektrális fotonfluxus szerinti sorrendje nem lesz azonos. Ezen sorrendbeli felcserélődés a mammográfiás csőfeszültség-tartományban (25-40 kVp) jelentősebb.

## V. Publikációk

A tézisek alapjául szolgáló referált folyóirat cikkek:

- [P1] M. Erdélyi, M. Lajkó, R. Kákonyi, and G. Szabó, “Measurement of the x-ray tube anodes’ surface profile and its effects on the x-ray spectra,” Med. Phys. 36, 587–593 (2009).
- [P2] R. Kákonyi, M. Erdélyi, and G. Szabó, “Monte Carlo analysis of energy dependent anisotropy of bremsstrahlung x-ray spectra,” Med. Phys. **36**, 3897–905 (2009).
- [P3] R. Kákonyi, M. Erdélyi, and G. Szabó, „Monte Carlo simulation of the effects of anode surface roughness on x-ray spectra,” Med. Phys. **37**, 5737–45 (2010).