

## Az MRI története, dinamikus szájüregi és maxillofaciális alkalmazása

### History of MRI, dynamic oral cavity and maxillofacial application

Dr. Szilyné Dr. Kiss Adél,

Semmelweis Egyetem, Orvosi Képző Klinika,

[kiss.adel94@gmail.com](mailto:kiss.adel94@gmail.com)

*Initially submitted February 1, 2023; accepted for publication April 16, 2023*

---

#### **Absrtact**

The incredible evolution of medicine in the 20th century was made possible by the appearance and rapid innovation of diagnostic procedures. The discovery of the medical application of X-rays gave the opportunity to image the human body without disrupting tissue structure. The use of X-rays spread around the world at an incredible speed and almost all medical fields, including dentistry, began to use them. In the second half of the 20th century, exponential improvement of computing technology replaced the summation scans with a new three-dimensional technique, Computer Tomography. Cone Beam CT scanners (CBCT), which use a non-traditional cone-shaped beam as a radiation source, have made three-dimensional imaging widely available in dentistry. However, the harmful side effects of X-rays soon came to the attention of the public, and further research led to the development of a previously unknown technique, magnetic resonance imaging (MRI). This device was the result of the collaborative work of many scientists, mainly physicists. From the experiment by Isidor I. Rabi, who proved that the atomic spin of nuclei can be changed in a magnetic field, to the scientists involved in the development of nuclear magnetic resonance spectroscopy, to the experiment of Paul C. Lautenburg, who was the first to create an image using this method. Raymond Damadian demonstrated that the NMR signal of tumour tissue differs from that of healthy tissue, thus providing the basis for the medical application of the method. Sir Peter Mansfield's new method greatly reduced the scanning time, allowing fast-moving organs such as the heart to be imaged. The measurement of contrast medium, and soon afterwards of blood oxygenation, made it possible to perform functional MRI examinations. The use of positron emission tomography combined with three-dimensional imaging techniques gives accurate diagnostic results, can be preferable in certain clinical situations and provides similar results at lower radiation levels. In terms of maxillofacial applications, CT and MRI scans are mainly used in cases of oral cavity tumour abnormalities. In dentistry, the imaging technique used in everyday practice is the CBCT, a non-traditional cone beam technique, which allows better quality images to be obtained in a shorter exposure time and using a lower dose of radiation.

**Kulcsszavak:** fogászat, képző, röntgen, RTG, Computer Tomográfia, CT, Mágneses Magrezonancia Képző, MRI, CBCT

**Keywords:** dentistry, imaging, roentgen, RTG, Computer Tomography, CT, Magnetic Resonance Imaging, MRI, CBCT

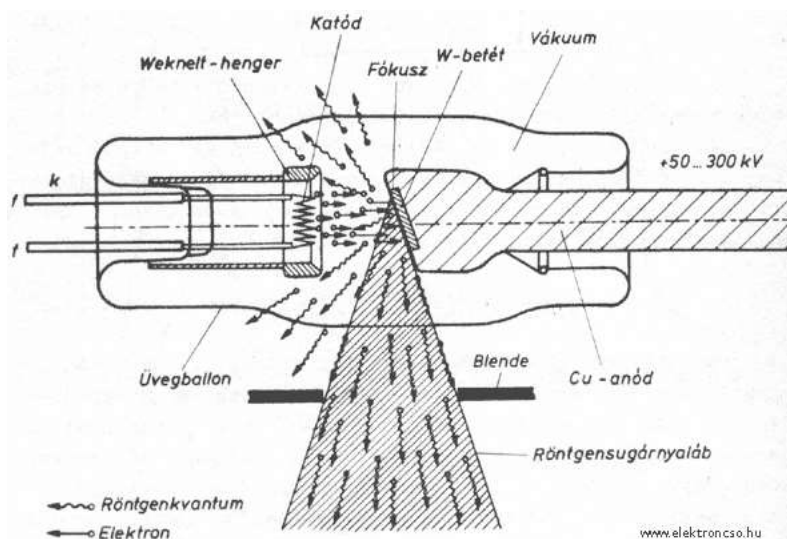
A 20. század tagadhatatlanul az orvostudomány nagy fejlődésének időszaka, melyben kiemelkedő szerepet játszott a képalkotó diagnosztika innovációja. A képalkotó diagnosztika megjelenése előtt az orvosok fizikális vizsgálattal tudtak információt szerezni a test kóros működéséről, amely azonban számos esetben nem bizonyult elegendőnek, így nagy volt az igény az olyan módszerek megalkotására, melyek az emberi test szerveit vizualizálni tudják. A képalkotó diagnosztika jelentősége tehát abban áll, hogy különböző patológiás eltérések kimutatásához a fizikális vizsgálaton túl olyan eszközöket teremtett, melyek a beteg szöveti egységének megbontása nélkül, azok belső szerkezetéről adnak információt. A mai, modern, bizonyítékokon alapuló orvoslás már elképzelhetetlen a képalkotó diagnosztika nélkül.

### **Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923)**

A radiológia története 1917-ben kezdődött, amikor Roentgen felfedezte, hogy az elektromágneses sugárzás egy bizonyos tartománya alkalmas az emberi test vizsgálatára és ezt a tartományt „x-ray”-nek nevezte el. Roentgen a felfedezés pillanatában még nem tudta pontosan ennek a sugárzásnak a tulajdonságait, ezért adta neki ezt az elnevezést. Sok országban, köztük Magyarországon az „x-ray” helyett a felfedező előtt tisztelegve, ezt a sugárzást röntgen sugárzásnak hívjuk, azonban az angolszász nyelvterületeken a kiejtési nehézségek miatt megmaradtak az „x-ray” kifejezés használatánál.[1] A hagyományos röntgen (RTG) fontos része a képalkotó diagnosztikának, mivel könnyen elérhető, olcsó és gyors vizsgálati módszer, így a mai napig széles körben használják az orvostudomány számos területén, mint például sürgősségi ellátás, ortopédia, traumatológia, tüdőgyógyászat, stb. Általánosságban elmondható, hogy a legtöbb szakma számára a röntgen diagnosztika az első képalkotó módszer, mely segítségével egy „durva támpontot” kapunk a beteg állapotáról és segíthet a további vizsgálatok indikálásában.



1. ábra Wilhelm Conrad Roentgen[2]



2. ábra : Modern röntgen cső sematikus rajza Forrás: <http://www.elektroncso.hu/cikkek/xray.php>

A röntgen fogászatban történő alkalmazásának jelentőségét nagyon korán felismerték, 14 nappal Roetgen Professzor cikke után Dr. Otto Walkhoff (1860-1934) német fogorvos Braunschweigben elkészítette az első fog felvételt. Walkhoff egy kollegája Giesel professzor segítségét kérte az első intraoralis felvétel elkészítésében, amely 25 percig tartott.[3] A módszert aztán Walter Koenig (1859-1936) fejlesztette tovább, akinek sikerült a röntgen cső módosításával a vizsgálati időt 25 percről 5 percre csökkenteni. A vizsgálati módszerben rejlő lehetőségek miatt alkalmazása hamar elterjedt a világon és a kor nagy fogászáttal foglalkozó tudósai, mint Morton, Kells, Rollins, and Raper mind foglalkoztak a röntgen sugárzás fogászati alkalmazásával. [3] Fontos megemlítenünk a panoráma röntgenfelvételt, mely a teljes fogazatról képes képet adni. A

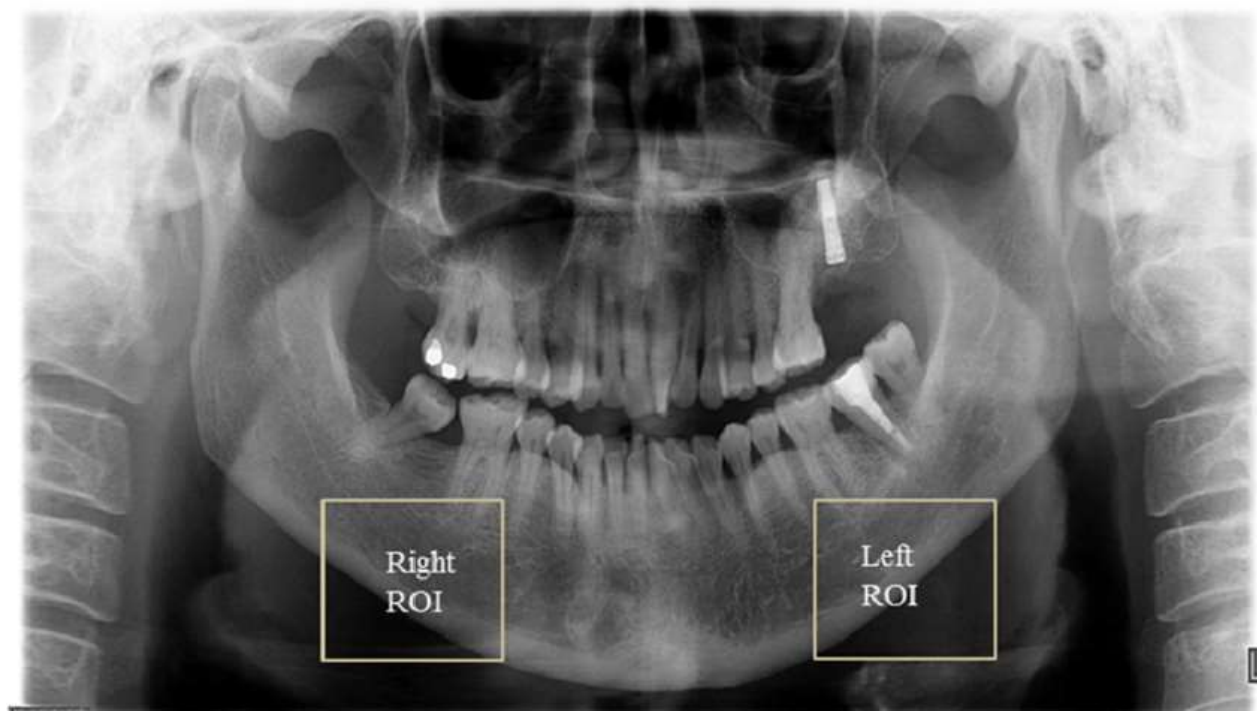


3. ábra Az első röntgenfelvétel a fogakról [3]

panoráma felvétel során egy kiterített sík képet kapunk a fogazatról, amely azonban egy

félköríven helyezkedik el. A módszer kifejlesztése Y. V. Paatero (1901-1963) nevéhez fűződik, aki 1946-ban intraoralisan elhelyezkedő film segítségével, 1949-ben pedig extraoralisan elhelyezkedő fotólemez segítségével készített panoráma röntgenfelvételt. Timo Nieminen mérnök segítségével építették meg az első kísérleti modellt, amelyben a röntgen cső még statikus volt és beteg forgott a fotólemez körül, majd a második, javított modellben módosítottak ezen, a betegnek mozdulatlanul kellett maradnia és már a röntgen cső forgott el a beteg körül. Az első kereskedelmi forgalomban is kapható modell 1960-ban látott napvilágot.[4] A panoráma röntgenfelvételt számos esetben használják a modern fogászatban. A teljesség igénye nélkül a

legfontosabb indikációs területei: egy általános állapot felmérés szuvasodás vagy pulpa eredetű eltérések diagnosztikájában, traumák kimutatására, a parodontitis diagnosztikájában, gyökér ciszta kimutatására, idegentest és nyálkő lokalizációjának megállapítására, stb. Megállapítható tehát, hogy a modern fogászat elengedhetetlen része a panoráma röntgenfelvétel, mely nagy segítséget nyújt a különböző betegségek diagnosztikájában.[5]



4. ábra Panoráma röntgenfelvétel. Saját képanyag.

A röntgenfelvételek hátránya szummációs jellegéből és rossz lágyrész differenciáló képességéből adódik. A szummációs jelleg azt jelenti, hogy az elkészített felvételen a szervezetben egymás mögött elhelyezkedő struktúrák egymásra vetülve ábrázolódnak, így diagnosztikus értékük sok esetben jelentősen elmarad a modern háromdimenziós képalkotó módszerekhez képest. Ennek ellenére bizonyos területeken ez a leggyakrabban alkalmazott technika (mammográfia).

### Computer Tomográfia (CT)

A röntgen sugárzás testen áthatoló képessége és a rohamosan fejlődő számítástechnika nyújtotta számítási kapacitás teremtette meg a lehetőséget egy új módszer, a Computer Tomográfia (CT) kifejlesztéséhez. A módszer alapja, hogy a testet vékony röntgensugárral világítják át, mely a testen áthaladva veszít intenzitásából. Ha ezt az átvilágítás azonos síkban több irányból készítik akkor feltérképezhető a test egyes pontjainak röntgensugár gyengítési együtthatója, melyhez

szürke skálát rendelve kirajzolódnak a szervezet struktúrái. A módszert Sir Godfrey Newbold Hounsfield (1914-2004) fejlesztette ki és 1972-ben publikálta a nagyközönség számára.[6] A felfedezés jelentősége, hogy nagyon pontos anatómia felbontás mellé nagymértékű lágyrész kontraszt is társul, így a különböző szövetek jól elkülöníthetőek lettek. A vizsgálatok számában bekövetkező rapid növekedés is alátámasztja a módszer jelentőségét, míg a 80-as években körülbelül 3 millió CT vizsgálatot végeztek egy évben, addig 2017-ben már 74 millió vizsgálatot készítettek az USA-ban.[7] Az 1970-es években a CT segítségével lehetőség nyílt a koponya, és azon belül az agy vizsgálatára, melynek a stroke ellátásban volt kulcsszerepe. A módszert aztán a kontrasztanyag alkalmazása tette teljessé. Példánknál maradva, az agy estén a modern perfúziós technikával képesek vagyunk meghatározni a stroke-on átesett beteg esetén az elhalt területet (core) és a még revascularizációval megmenthető (penumbra) részek méretét. A módszer technikai háttere dióhéjban, hogy kontrasztanyag adás segítségével kiszámítható az agy egyes területeinek vérátáramlása, mely segítségével meghatározható a csökkent vagy vérellátással egyáltalán nem rendelkező terület.

A CT kontrasztanyag további alkalmazási területe az invazív angiographia, mely esetben lehetőséget nyújt az erek ábrázolására, a stroke ellátásban ez egy hatalmas lehetőség, hiszen noninvazív módon percek alatt diagnosztizálható a stroke és ugyanazon a gépen kimutatható hogy ezt egy olyan érelzáródás okozza-e, amely műtéti úton megoldható. Ebben az esetben természetesen a hagyományos röntgen technikával működő angiográfiáé a szerep, mely segítségével eltávolítható az érelzáródást okozó trombus. Szerintem ez jól példázza, hogy a modern háromdimenziós képalkotás és a szummációs hagyományos röntgen technika nem egymással versengő modalitások, hanem egymást kiegészítő módszerek. A CT angiographiát természetesen a test más részein is használják a napi rutin részeként, így az aorta megbetegedései, a hasi erek, vagy az alsó végtag erei is könnyen ábrázolhatók.

A szív CT is a koponya angiographiás CT-hez hasonlóan az invazív cardiographiát hivatott bizonyos esetekben kiváltani. A szív CT azonban csak a legmodernebb CT készülékkel lehetséges, mivel a szív gyorsan mozgó szervként nem ábrázolható megfelelően egy régebbi, lassú készülékkel. Természetesen ebben az esetben is megállapítható, hogy bizonyos esetekben képes volt kiváltani a hagyományos katéteres módszert, azonban a koronáriák kezelése csak a katéteres technikával érhető el. Fontos megjegyezni, hogy az első CT készülék megjelenése óta a technológia fejlődése ezen a területen is rohamos volt, hiszen egy mai modern gép korábbi elődjéhez képest jelentősen jobb minőségű képet generál fele akkora sugárterhelés kárára. Összefoglalva megállapítható, hogy a mai modern orvosi működéshez elképzelhetetlen a CT készülékek alkalmazása, talán ezért is hívják a CT gépet az orvosok "igazság gépének" azaz „truth machine”-nak.



5. ábra Sir Godfrey Newbold Hounsfield 1972-ben az első CT készülékkel Forrás: <http://catalinaimaging.com/history-ct-scan/>

### MRI és rövid története

A sugárterhelés, amely a vizsgálatokkal jár korlátozza használatát, hiszen minden egyes vizsgálat során gamma fotonok hatolnak át testen, melyek közismerten különböző mechanizmusokkal károsítják a DNS-t, így elősegíthetik a rákos megbetegedések kialakulását. Az MRI vizsgálatok ezzel szemben veszélytelenek, jelen tudásunk szerint az emberi szervezetre káros hatással nem rendelkeznek. MR készülék egy igen komplex rendszer, melynek belsejében a föld mágneses erejének többszöröse uralkodik, amelyben a hidrogén atomok spin állapotának befolyásolásával vagyunk képesek háromdimenziós képet alkotni. A CT-hez képest az MRI gép működése bonyolultabb, komplexebb rendszer, mely magában hordozza a vizsgálatok variálhatóságának kitapasztalhatatlan tárházát.

Az MRI története komplexitása miatt sok felfedezéshez kötött, melyek aztán együttesen vezettek az MRI gép megalkotásához. Az első lépés, az alap fizikai jelenség felfedezése Isidor I. Rabi (1898-1988) nevéhez fűződik, aki egy az Osztrák -Magyar Monarchia területén született, majd Amerikába emigrált fizikus volt. Rabi Stein-Gerlach a kísérletet továbbfejlesztve rájött, hogy a váltakozó mágneses mező alkalmas a klór- és lithium atommagok spin állapotának megváltoztatásához.[8]

A pontosabb megértéshez tisztáznunk kell, hogy mi is az a spin. Legegyszerűbben az elektronok esetén lehet megérteni ezt a kvantummechanikában használt fogalmat. A Bohr atommodell, mely esetén az elektronok a bolygókhoz hasonlóan az atommagok körül körpályán keringenek, a 1900 években megkérdőjeleződött és helyette a fizikai kísérletek alapján egy új, úgynevezett kvantummechanikai atommodell került megalkotásra. Ebben az atommodellben az elektronokat kvantumszámokkal jellemezzük, az első, azaz a fő kvantumszám az elektron energia állapotát jellemzi, a második, azaz a mellékkvantumszám az elektron pályájára vonatkozik, a harmadik, azaz a mágneses kvantumszám a mágneses tulajdonságot írja le, míg a negyedik kvantumszám pedig az elektron spin állapotát határozza meg. Ennek értéke  $+1/2$  vagy  $-1/2$  lehet. A spin kvantumszám az elektron külső mágneses térben történő viselkedését mutatja meg. Legegyszerűbben ezt úgy lehet megérteni, hogy az elektront egy kis dipólus mágnesként képzeljük el, mely külső mágneses térben vagy azzal megegyező, vagy azzal ellentétes irányba képes állni. Az atommagok is jellemezhetők ezzel a tulajdonsággal, melyet a fizikában az impulzusmomentummal írunk le. Az elektronokkal szemben azonban az atommagban elhelyezkedő protonok és neutronok eredője adja meg az atommag spinjét. Ha az atommag spinje nem 0, akkor a külső mágneses térre reagál, azaz abszorbeál és emittál elektromágneses sugárzást és „rezonál” amikor külső mágneses térbe tesszük.

Az MR képalkotás szempontjából fontos hidrogén atom spinje  $1/2$ , amely megfelel a proton spinjének. A korábban említett Stein-Gerlach kísérletben inhomogén mágneses mezőbe vezetett ezüstnyaláb esetén a klasszikus fizikai értelmezés szerint az ezüst molekuláknak kis dipólus mágnesként kellett volna viselkedniük, így random módon szóródniuk, azonban ehelyett azt tapasztalták, hogy az atomok két diszkrét pontban szóródtak. Ez azzal volt magyarázható, hogy az atommagoknak van egy saját, a környezettől független impulzusmomentuma, mely minden atommag esetén egy magasabb vagy alacsonyabb energia állapotot jelent (+ vagy -). Rabi kísérletének lényege, hogy a váltakozó mágneses mező segítségével el tudta érni, hogy az atomok a két energiaállapot között váltsanak. Rabi munkájáért 1942-ben Nobel díjat kapott. [9]

A képalkotásban történő bevonása előtt a spektrometriában alkalmazták. A módszer alapját a Nukleáris Magrezonancia (NMR) képezi, mely segítségével szilárd vagy oldat fázisú mintákról képesek vagyunk molekuláris szintű szerkezeti információt szerezni. A módszert korlátozza, hogy csak olyan atomok vizsgálhatók, melyek spinje nem 0, így reagálnak a külső mágneses térre. Az alapok letétele két tudós, Edward Mills Purcell (1912-1997) amerikai fizikus és Felix Bloch (1905-1983) svájci-amerikai fizikus nevéhez fűződik. Purcell és munkatársai, Torrey és Pound a Massachusettsi egyetemen vizsgáltak egy statikus mágneses mezőbe helyezett paraffinnal töltött csövet, míg Bloch és munkatársai, Hansen és Packard a Stanfordi Egyetemen  $1,5\text{ cm}^3$  vízmintán végeztek hasonló eljárást. Mindketten a vizsgálati mintára rádiófrekvenciás (RF) impulzust bocsátottak, mely következtében Purcell munkacsoportja az eredeti jel 0,4%-os gyengülését, míg Bloch munkacsoportja a besugárzás utáni gyenge radiofrekvenciás impulzust



detektáltak.[9] Mindkét kutatócsoport ugyanarra a következtetésre jutott, hogy a mintákban az RF impulzus a hidrogén atomokat gerjeszti, ez pedig azok spin állapotával és relaxációjával, azaz a magasabb energiaállapotból az alacsonyabb energiaállapotba való visszatéréssel van összefüggésben. Felfedezésük jelentőségét mutatja, hogy 1952-ben Purcell és Bloch megosztva fizikai Nobel díjat kaptak. A befejező lépést Erwin L. Hahn (1921-2016) tette meg a spin-echo technika kifejlesztésével.[10] Ezen technika szerint az atomokat az úgynevezett Lamor frekvencián gerjesztik, így nagyobb kimenő jelet lehet detektálni. Hahn ezt a módszert fejlesztette tovább és koherens interferenciákkal tovább tudta növelni a kimenő jel nagyságát. Ennek a technikának tovább fejlesztett változatai a mai napig megtalálhatók az MRI készülékekben is.[9]

A humán alkalmazás jelentőségére 1971-ben Raymond Damadian (1936-2022) hívta fel a figyelmet, amikor kimutatta, hogy T1 relaxáció során a tumoros szövet jelentősen más jelet ad, mint az egészséges szövet.[11] Az NMR spektroszkópia azonban nem volt képes a pontos anatómia struktúra leképezésére. Paul C. Lautenburg egy tumoros szöveteket vizsgáló NMR előadást hallgatva kapta az ötletet, hogy amennyiben nem homogén mágneses teret alkalmazunk, akkor a háromdimenziós struktúrák leképezhetővé válnak. Az első sikeres kísérletet 1973-ban végezte el, ahol nehézvízbe mártott, két vízzel töltött kapillárisról sikerült képet alkotnia.[12] Az első élő szövet, amelyet sikerült leképeznie egy répa szára volt, majd folytatta komplexebb struktúrák leképezésével, mint egy narancs és egy sertéscomb (Ezek valójában aznapi ebédjének összetevői voltak.) 1976-ban végül sikerült szívet, tüdőt és illetve különböző daganatokat leképeznie.[13][14]



6. ábra Raymond Damadien az első teljes test leképezésére képes MRI készülékkel

A módszer nagy hátránya lassúsága volt, melyen Sir Peter Mansfield (1933-2003), angol fizikus technikai újítása javított. Mansfield is korábban NMR technikával foglalkozott, főként a szervetlen vegyületek alakjának leképezését kutatta és Lautenbur biológiai szöveteket vizsgáló munkájának hatására kezdett élő szövetekkel is foglalkozni. Munkacsoportja segítségével megalkotta a jelenlegi MRI vizsgálatok alapját jelentő frekvencia és fázis dekódolás módszert, mely segítségével 1 mm szelet kijelölése vált lehetővé a leképezendő objektumon belül (line scan imaging).[15] Ezen a ponton fontos megemlítenünk még Richard Robert Ernst (1933-2021) svájci fizikust, aki a számos egyéb technikai újításon felül, a 60-as években sikeresen megalkotta az NMR a Fourier transzformáció elve alapján történő képfeldolgozást. Ezt az elvet tovább fejlesztve a kettő és háromdimenziós NMR képek feldolgozása lehetővé vált, melyet 1975-ben publikált. [16] A mai modern MRI gépek a mai napig ezen elv alapján dolgozzák fel a kapott jeleket. Richard Ernst eredményei elismeréseképpen 1991-ben kémia Nobel díjjal jutalmazták. Mansfield, felhasználva az általa kifejlesztett szelet kijelölési módszert és az Ernst által meghatározott jelfeldolgozási technikát 1977-ben megalkotta az első MRI képet az egyik PhD hallgatója ujjáról. Mansfield és kutatócsoportja egy évvel később megépítették az első saját fejlesztésű kísérleti MRI gépet, azonban a kutatócsoport tagjai félték a nagy térerősség szívinfarktust okozó vélt hatása miatt, ezért senki nem merte elvállalni a vizsgálatot.[15]

Mansfield így saját maga vállalta a kockázatot és, készítettek róla egy teljes hasi vizsgálatot. Mansfield nevéhez kapcsolódik továbbá az echo-planar imaging technika kifejlesztése is, mely a képalkotás sebességét százszorosára tudta emelni, melynek a gyorsan mozgó szerveknél (pl. szív) van jelentősége.[17] Lautenbur és Mansfield elért eredményeik jelentősége miatt közösen 2003-ban Nobel díjat kaptak.

### **A mai MRI gépek**

A végső lépést a mai modern klinikailag is használható MRI gépekhez William A. Elderstein (1944-2014) amerikai fizikus tette meg. 1977-ben lehetőséget kapott, hogy csatlakozzon az Aberdeeni Egyetem magrezonanciával foglalkozó laboratóriumához, ahol számos különböző MRI-hez kapcsolódó technikát kipróbált, illetve kifejlesztette a jelenleg is az MRI készülékek alapvető képalkotási metódusaként ismert spin warp imaging technikát.[18] 1980-ban Elderstein aberdeemi kiküldetése lejárt, így visszatért New Yorkba, ahol a General Electricnél (GE) helyezkedett el, mint az MRI fejlesztéséért felelős vezető mérnök. Ebben az időben érdekes vita alakult ki a különböző fejlesztő cégek között. A GE, Elderstein vezetésével magas (1,5 Tesla) térerősségű képalkotó rendszerek fejlesztése mellett kötelezte el magát, amíg a konkurencia (Toshiba, Siemens) az alacsony térerősségű (0,45 Tesla-nál kisebb) rendszerekben látta a megoldást. 1983-ban bemutatták az első 0,14 Tesla-s rendszert, 1985-ben pedig Elderstein a 1,5 Tesla-s MRI rendszerét.[9]

Hamar kiderültek a magasabb térerősség képminőségben megjelenő előnyei, így a konkurens cégek is elkezdték saját verziójuk kifejlesztését. A mai napig ez a magasabb térerősségű rendszer a legelterjedtebb a világon, számos nagyobb centrumban már megjelentek 3 Tesla-s MRI rendszerek, melyek gyorsabb vizsgálatot és tisztább, jobb képminőséget biztosítanak. Intenzív kutatások zajlanak a magasabb térerősségű MRI gépek kifejlesztésének irányába is. Jelenleg számos helyen végeznek kutatásokat a 7 Tesla-s MRI gépekkel, amelyekkel még jobb felbontást és még zajmentesebb képet lehet kapni, mint a kisebb térerősség társaikkal.[19] Ezen gépek létjogosultsága főként a nagyon apró eltérések elkülönítésében van, azonban a magas térerősségű mágneses tér miatt a betegben fémtartalmú tárgy nem lehet, így viszonylag korlátozottabb a felhasználhatósága a 1,5-3 Tesla-s MRI rendszerekhez képest. Kísérleti jelleggel beüzemelték már ennél is nagyobb 10 Tesla feletti MRI készülékek is, azonban ezen gépek pontos felhasználhatósága még kutatások tárgyát képezi.[20]

### **Az MRI előnye**

Az MRI gépek nagyszerűsége abban áll, hogy a különböző szekvenciák segítségével a CT-hez képest számos többlet információt kapunk. Míg a CT készülék a röntgensugár gyengítési tulajdonsága alapján alkotja meg a képet, addig az MRI képes a protonokat gerjesztő szekvenciák módosításával más és más jellegű képet alkotni, így a szövetek különböző tulajdonságait kiemelni. Ilyenek például T1 és T2 súlyozott felvételek, zsírelnyomósos technikák (pl. FLAIR),

a szövet közötti diffúziós tulajdonságokat kimutató technikák (diffúzió súlyozott és ADC felvételek), stb.. A technika fejlődésével olyan gyorsan mozgó szervek, mint a szív is leképezhetővé váltak, illetve felhasználva a véráramban mozgó gerjesztett protonokat angiographiás felvételek készítése is lehetővé vált kontrasztanyag adása nélkül. A híg folyadékok más jeladását felhasználva olyan, korábban csak invazív módon vizsgálható szervek, mint az epeutak is leképezhetőek lettek. Ilyen például az MRI cholangiographia, mely az ERCP-hez (Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography - endoszkópos retrográd cholangiopancreatográfia) hasonló diagnosztikus értéket képvisel, annak invazivitása és kockázatai nélkül. A MRI gépek a következő években további fejlődésen mentek keresztül. Mansfield a 80-as években sikeresen bizonyította, hogy az EPI gyors leképezés miatt alkalmas az agyi oxigenizáció folyamatos mérésére, mellyel utat nyitott a funkcionális MRI kifejlesztéséhez. 1991-ben az EPI technikát és gadolinium kontrasztanyagot felhasználva alkotta meg John William Belliveau (1959-2014) és munkatársai az első funkcionális MRI (fMRI) képet az agyról. [21] Az fMRI előnye a hagyományos MRI képalkotással szemben, hogy a vizsgálat során nemcsak statikus képet kapunk az agyról, hanem funkcionális információt is. A vizsgálat során az alannyal különböző feladatokat végeztetnek, mely az agy különböző területeinek neuron aktivitás fokozódást és az ezzel együtt járó oxigén és energia igény növekedést okozza, melyet aztán a véráramlás növekedése követ. Az MRI készülék a véráramlásban bekövetkező változásokat tudja mérni és ez alapján lehet következtetni arra, hogy az adott feladat milyen agyi területek aktiválódását vonja maga után. Belliveau és munkatársai által kifejlesztett módszer, a dynamic susceptibility contrast - dinamikus szuszceptibilitási kontraszt (DSC) segítségével sikerült az első ilyen jellegű képeket megalkotni. Az eljárás során az elsődleges látókéregre gadolinium bólus beadása előtt és után készítették echo-planáris technikával képeket, miközben az önkéntesek egy villogó sakktablamintát néztek szemüvegen keresztül. Ezután a két felvételtől kiszámíthatók a különböző agyi vérmennyiségek, melyek összehasonlításával ingerelt állapotokban megnövekedett aktivitást mutató funkcionális térképeket kaptunk.

Ezzel csaknem megegyező időben mutatták ki, hogy a deoxigenált- oxigenizált hemoglobin, mint endogén kontrasztanyag is felhasználható az fMRI mérésekhez, így megszületett a BOLD (Blood Oxygen Level Dependent ) technika. A BOLD-módszert az AT&T Bell Laboratóriumok tudósa, Seiji Ogawa fejlesztette ki a Minnesotai Egyetem MRI-kutatóival együttműködve. A BOLD-kontrasztot először patkányokon mutatták be 7T-n 1990-ben, és először 1992-ben használták fMRI-aktivációs vizsgálatokhoz az emberi látókéregben 4T-n on-off fénystimuláció során, amit a Proceedings of the National Academy of Sciences-ben publikáltak. Mivel teljesen noninvazív módszer volt és nem igényelte exogén kontrasztanyag befecskendezését, így a BOLD technika lehetővé tette több agyi aktivációs kísérlet egyetlen ülésben történő elvégzését. A BOLD módszer gyorsan kiszorította a DSC eljárást és ma ez a legelterjedtebb fMRI módszer[20] Jelentősek továbbá a klinikai gyakorlatban is alkalmazott PET-MRI hibrid rendszerek is. A PET, azaz pozitron emissziós tomográfia során pozitron sugárzást kibocsátó molekulákat

(leggyakrabban glukóz) adnak be a szervezetbe. A glukóz beadása esetén a sugárzó anyag felhalmozódik a nagyobb anyagcseréjű területeken (pl. daganatokban) és az itt keletkező pozitronok gammasugárzássá alakulnak, melyet képesek vagyunk detektálni. A PET önmagában nem ad megfelelő anatómia felbontást, ezért kell CT vagy MR rendszerekkel összehangolni, így jó anatómia felbontás mellett funkcionális információt is nyerünk. A világban inkább a PET-CT rendszerek terjedtek el, de néhány helyen fellelhetünk PET-MR készülékeket is, Magyarországon Kaposváron található egyedül ilyen hybrid készülék.[22] Az első két ilyen berendezést 2010-ben helyezték üzembe a Mount Sinai Medical Center-be az USA-ba, illetve Genovai Egyetemi Kórházban Svájcban.

### **Fogászati alkalmazások**

A háromdimenziós képalkotó módszerek a fogászatban főként a daganatos megbetegedések, illetve komplexebb szájsébzészeti és maxillo-faciális beavatkozások esetén kerülnek felhasználásra. A fej-nyaki daganatok diagnózisa során fel kell térképezni az elsődleges daganat teljes kiterjedését, a lokoregionális nyirokcsomók érintettségét és távoli metasztatikus betegség jelenlétét. A PET/CT vagy PET/MRI vizsgálatok ma már könnyen elérhetőek és eredményeik közvetlen hatással vannak a kezelésre és a prognózisra. A kezelés előtti és utáni PET képalkotás széles körben használt módszerre vált, fej-nyaki laphámsejtes karcinómában szenvedő betegeknél a kezdeti stádium besorolásra és a kezelés utáni követésre. Ezenkívül a PET/CT és potenciálisan a PET/MRI is nagyon hasznos a nem megnagyobbodott nyirokcsomók mikrometasztatikus betegségeinek azonosításában összehasonlítva a CT-vel és az MRI-vel. A PET/MR összességében a PET-CT-hez hasonlóan pontos diagnosztikai eredménnyel bír, bizonyos klinikai helyzetekben előnyösebb lehet és alacsonyabb sugárzás mellett biztosít hasonló eredményt. [23], [24]

Módszer	Előny	Hátrány
UH	-vezérlésével sejt minta vehető →specificitása 98-100%-ra nő - olcsó, gyors[25], [26]	-a vizsgálatot végző orvos készségére hagyatkozás – a mélyebb struktúrák vizsgálata limitált a korlátozott légyszöveti behatolás és csont vagy levegő műtermék miatt[25], [26]
CT	-pontossága nyaki nyirokcsomó- metasztázis meghatározásában 73-80% [25]	-sugárterhelés – a kontrasztanyag által kiváltott nephropathia kockázata[25]
MR	-pontossága nyaki nyirokcsomó- metasztázis meghatározásában 73-80% [25]	-a meszesedést és a csont kortikálisát rosszabbul ábrázolja, mint a CT[25]
PET-CT	-pontossága (>90%) magasabb, mint a CT-é és a hagyományos MRI-é -távoli áttétek, okkult tumorok és rejtett helyzetű nyirokcsomók kimutatása, hegesedés és a reziduális vagy recidív tumorok differenciál diagnosztikája [27]	– 12 órán át tartós radioaktivitás - ellenjavallt nem kontrollált cukorbetegségben, terhességben és azoknál a betegeknél, akik nem tudnak nyugodtan feküdni 1-2 órán keresztül[27]
PET-MR	-PET- CT-hez hasonló pontosság -alacsonyabb sugárzás[24], [27]	
DWI vagy	szignifikánsan megnöveli az MR szenzitivitását[28]	

7. ábra Fej-nyak régió daganatainak képalkotó diagnosztikája

A CT elterjedését a fogászatban nagymértékben korlátozta a CT gépek komplexitása, nagy méretük és magas áruk. Erre a problémára kínált megoldást két tudós az 90-es évek végén egy újfajta háromdimenziós képalkotási módszerrel, melyet elsődlegesen a fogászati szempontok alapján fejlesztettek ki. Yoshinoro Arai Japánban, illetve Piero Mozzo Olaszországban csaknem egy időben álltak elő egy újfajta CT készülékkel, mely a hagyományos CT géphez képest jelentősen olcsóbb, kisebb helyen is elfér, ezáltal lehetővé tette a mindennapi fogászati alkalmazását.[29] Ez a technikai eszköz a CBCT (Cone Beam Computer Tomography), mely nevét a röntgensugár nyálábjának alakjáról kapta. A hagyományos CT készülékben legyező alakú röntgensugár nyálábot alkalmaznak, mely így a test egy szeletének a letapogatására

alkalmas, majd az asztal tovább mozgatásával következő szelet is letapogatásra kerül. Ennek a folyamatnak az ismétlésével történik meg aztán a teljes régió leképzése. Az előbb említett két tudós újdonsága, hogy a legyező alak helyett egy kúp alakú sugárnyalábot alkalmaztak, melyet aztán a beteg másik oldalán elhelyezett nagy lapos detektor érzékelt. A sugárforrás és a detektor egy C karon helyezkedik el és páciens körül 270-360° körbe fordulva készít 180-1024 summációs képet, amelyből aztán rekonstrukciós eljárásokkal 3D képet lehet alkotni. A szájüregről ezen technika felhasználásával jobb minőségű képet lehet készíteni, rövidebb idő alatt, kisebb sugárdózis felhasználásával, nem beszélve arról, hogy a CBCT a hagyományos CT készülékekhez képest töredék áron érhető el. [29]A CBCT ennek következtében hamar elterjedt, számos területen kezdték alkalmazni, mint az implantológia, maxilla és mandibula törések diagnosztikája és műtéti tervezése, tumor diagnosztika, nyálkövek diagnosztikája, impaktált fogak elhelyezkedése. Jelenleg számos helyen használnak olyan készülékeket, melyek a CBCT mellett panoráma röntgen és hagyományos fogászati röntgenfelvételeket is tudnak készíteni. Az MRI rendszerek jelenleg a radiológián belül az egyik legdinamikusabban fejlődő technikai ágat képviselik, hiszen káros hatás nélkül képesek kiváló lágyrész-kontrasztú, jó felbontású képeket készíteni. Jelenleg legnagyobb hátrányunk, hogy a CT-vel összehasonlítva lassúak, illetve fenntartásuk és beszerzésük is jelentős összeg egy intézmény számára. Kifejlesztésük története kifejezetten izgalmas, ahogy az alapvetői fizikai jelenségtől alig pár évtized alatt eljutottunk a kóros eltérések milliméter pontosságú meghatározásáig. Természetesen ehhez szükség volt számos kiváló elme hozzájárulására, illetve a 20. század informatikai forradalmára, hiszen minden egyes MR kép mögött hatalmas mennyiségű számítási feladat áll.

### Irodalomjegyzék

- [1] E. BERCOVICH AND M. C. JAVITT, "Medical Imaging: From Roentgen to the Digital Revolution, and Beyond," *Rambam Maimonides Med J*, vol. 9, no. 4, p. e0034, 2018, <https://doi.org/10.5041/RMMJ.10355>
- [2] "Wilhelm Conrad Röntgen – Biographical - NobelPrize.org." <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/roentgen/biographical/> (accessed May 01, 2023).
- [3] J. FORRAL, "HISTORY OF X-RAY IN DENTISTRY História dos raios X em Odontologia".
- [4] D. HALLIKAINEN, "History of panoramic radiography," *Acta radiol*, vol. 37, no. 3 PART 2, pp. 441–445, 1996, <https://doi.org/10.3109/02841859609177678>
- [5] V. E. RUSHTON AND K. HORNER, "The use of panoramic radiology in dental practice," *J Dent*, vol. 24, no. 3, pp. 185–201, 1996, [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(95\)00055-0](https://doi.org/10.1016/0300-5712(95)00055-0)
- [6] E. J. HEFFERNAN, "The Evolution of Whole-Body Imaging," vol. 1, no. 212, pp. 3–13, 2010.
- [7] Y. TANVEER, F. AHMED, A. ASLAM, AND S. TARIQ MEHMOOD CHEEMA, "Retrospective audit of CT scans performed at a hospital for surgical patients," *Annals of Medicine and Surgery*, vol. 78, no. October 2021, p. 103788, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.103788>
- [8] I. I. RABI, J. R. ZACHARIAS, S. MILLMAN, AND P. KUSCH, "A New Method of Measuring Nuclear Magnetic Moment," *Physical Review*, vol. 53, no. 4, p. 318, Feb. 1938, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.318>
- [9] P. J. NACHER, "Magnetic Resonance Imaging: From Spin Physics to Medical Diagnosis," *Progress in Mathematical Physics*, vol. 55, pp. 159–193, 2009, [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8799-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8799-0_6)

- [10] E. L. HAHN, “Spin echoes,” *Physical Review*, vol. 80, no. 4, pp. 580–594, 1950, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.80.580>
- [11] R. DAMADIAN, K. ZANER, D. HOR, AND T. DIMAIO, “Human Tumors Detected by Nuclear Magnetic Resonance,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 71, no. 4, p. 1471, 1974, <https://doi.org/10.1073/pnas.71.4.1471>
- [12] P. C. LAUTERBUR, “Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance,” *Nature*, vol. 242, no. 5394, pp. 190–191, 1973, <https://doi.org/10.1038/242190a0>
- [13] J. DAWSON, “Paul Lauterbur 1929–2007,” *Biographical Memoirs*, p. 20, 2012, [Online]. Available: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/lauterbur-paul.pdf>
- [14] “Paul C. Lauterbur – Biographical - NobelPrize.org.” <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2003/lauterbur/biographical/> (accessed May 01, 2023).
- [15] “Peter Mansfield (1933–2017),” p. 2017, 2017.
- [16] A. KUMAR, D. WELTI, AND R. R. ERNST, “NMR Fourier zeugmatography,” *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 213, no. 2, pp. 495–509, Dec. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2011.09.019>
- [17] P. MANSFIELD, “Real-time echo-planar imaging by NMR,” *Br Med Bull*, vol. 40, no. 2, pp. 187–190, 1984, <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bmb.a071970>
- [18] W. A. EDELSTEIN, J. M. HUTCHISON, G. JOHNSON, AND T. REDPATH, “Spin warp NMR imaging and applications to human whole-body imaging.,” *Phys Med Biol*, vol. 25, no. 4, pp. 751–756, Jul. 1980, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/25/4/017>
- [19] O. KRAFF AND H. H. QUICK, “7T: Physics, safety, and potential clinical applications,” *J Magn Reson Imaging*, vol. 46, no. 6, pp. 1573–1589, Dec. 2017, <https://doi.org/10.1002/jmri.25723>
- [20] “Magnetism - Questions and Answers in MRI.” <https://mriquestions.com/csi.html> (accessed May 01, 2023).
- [21] J. W. BELLIVEAU *ET AL.*, “Belliveau91.Pdf.” pp. 621–768, 1991.
- [22] Z. TÓTH *ET AL.*, “[Hungarian clinical application opportunities of PET/MR imaging and first experiences],” *Orv Hetil*, vol. 159, no. 34, pp. 1375–1384, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1556/650.2018.31141>
- [23] K. S. TRAYLOR, N. KOONTZ, AND K. MOSIER, “Squamous Cell Carcinoma: PET/CT and PET/MRI of the Pretreatment and Post-Treatment Neck,” *Semin Ultrasound CT MR*, vol. 40, no. 5, pp. 400–413, Oct. 2019, <https://doi.org/10.1053/j.sult.2019.07.004>
- [24] M. W. HUELLNER, “PET/MR in Head and Neck Cancer - An Update,” *Semin Nucl Med*, vol. 51, no. 1, pp. 26–38, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2020.07.006>
- [25] V. VISHWANATH, S. JAFARIEH, AND A. REMBIELAK, “The role of imaging in head and neck cancer: An overview of different imaging modalities in primary diagnosis and staging of the disease,” *J Contemp Brachytherapy*, vol. 12, no. 5, pp. 512–518, 2020, <https://doi.org/10.5114/jcb.2020.100386>
- [26] R. B. J. DE BONDT *ET AL.*, “Detection of lymph node metastases in head and neck cancer: a meta-analysis comparing US, USgFNAC, CT and MR imaging,” *Eur J Radiol*, vol. 64, no. 2, pp. 266–272, Nov. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2007.02.037>
- [27] T. A. SZYSZKO AND G. J. R. COOK, “PET/CT and PET/MRI in head and neck malignancy,” *Clin Radiol*, vol. 73, no. 1, pp. 60–69, Jan. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.crad.2017.09.001>
- [28] H. C. THOENY, F. DE KEYSER, AND A. D. KING, “Diffusion-weighted MR Imaging in the Head and Neck,” vol. 263, no. 1, pp. 19–32, Apr. 2012, <https://doi.org/10.1148/radiol.11101821>
- [29] E. VENKATESH AND S. V. ELLURU, “Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry,” *J Istanb Univ Fac Dent*, vol. 51, no. 3 Suppl 1, p. S102, Nov. 2017, <https://doi.org/10.17096/jiufd.00289>