

# Tartalomjegyzék

|                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. A sugárbiológia ismeretek jelentősége a klinikai diagnosztikában és terápiában, korai kezdetek</b> | <b>12</b> |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                | 18        |
| <b>2. Az ionizáló sugárzás típusai</b>                                                                   | <b>19</b> |
| 2.1. Az ionizáló sugárzások fajtái . . . . .                                                             | 19        |
| 2.2. Természetes eredetű sugárforrások . . . . .                                                         | 20        |
| 2.2.1. Kozmikus sugárzás . . . . .                                                                       | 20        |
| 2.2.2. Földkérgi eredetű radionuklidok . . . . .                                                         | 22        |
| 2.3. Mesterséges eredetű sugárforrások . . . . .                                                         | 23        |
| 2.3.1. Ipari tevékenység miatt megnövekedett sugárterhelés . . . . .                                     | 23        |
| 2.3.2. Orvosi sugárforrások . . . . .                                                                    | 25        |
| 2.3.3. Fegyverkezés . . . . .                                                                            | 29        |
| 2.4. A sugárterhelés meghatározásánál alkalmazott dózismennyiségek . . . . .                             | 29        |
| 2.5. Sugárvédelem alapelvei . . . . .                                                                    | 34        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                | 36        |
| <b>3. Sugárfizikai és sugárkémiai alapismeretek</b>                                                      | <b>38</b> |
| 3.1. Az atom szerkezete, ionizáció, gerjesztés . . . . .                                                 | 38        |
| 3.2. Atommodellek . . . . .                                                                              | 39        |
| 3.3. Magmodellek . . . . .                                                                               | 40        |
| 3.4. Ionizáló sugárzások felosztása . . . . .                                                            | 42        |
| 3.4.1. Részecske- vagy korpuszkuláris-sugárzás . . . . .                                                 | 42        |
| 3.4.2. Elektromágneses vagy foton sugárzás . . . . .                                                     | 45        |
| 3.5. Sugárzás és anyag kölcsönhatása . . . . .                                                           | 47        |
| 3.5.1. Az $\alpha$ - és $\beta$ -sugárzás kölcsönhatása az anyaggal . . . . .                            | 48        |
| 3.5.2. A $\gamma$ - és röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal . . . . .                               | 49        |
| 3.5.3. Sugárgyengítési törvény . . . . .                                                                 | 51        |
| 3.6. Kémiai reakciók és kötések . . . . .                                                                | 54        |
| 3.6.1. Kémiai kötések . . . . .                                                                          | 54        |
| 3.7. A sugárzás biológiai hatásának időbeni lefolyása . . . . .                                          | 57        |

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7.1. Szabadgyök-képződés . . . . .                                                                | 58        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                           | 60        |
| <b>4. Sejtszintű sugárkárosodások, a lineáris energiáttranszfer és a relatív biológiai hatás</b>    | <b>62</b> |
| 4.1. Sugárhatásra kialakuló fizikai-kémiai folyamatok . . . . .                                     | 62        |
| 4.2. Az ionizáló sugárzás sejten belüli célpontja, sugárhatásra kialakuló DNS károsodások . . . . . | 65        |
| 4.3. A sejtek sugárérzékenységét, a túlélő sejtek sorsát befolyásoló folyamatok . . . . .           | 66        |
| 4.4. A sejtek halálához vezető letális kromoszóma aberrációk, biodozimetriai alapok . . . . .       | 68        |
| 4.5. A lineáris energia transzfer és a relatív biológiai hatás . . . . .                            | 69        |
| 4.5.1. A relatív biológiai hatás fogalma, viszonya a lineáris energia transzfer értékhez . . . . .  | 69        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                           | 72        |
| <b>5. A sugárkárosodások javítása, a sejtsztódás zavarai, a sugárzás okozta sejthalál</b>           | <b>73</b> |
| 5.1. A DNS károsodások észlelése . . . . .                                                          | 74        |
| 5.2. A kétláncú DNS-törések javítása . . . . .                                                      | 75        |
| 5.2.1. A nem-homológ DNS végeket összekapcsoló hibajavító folyamat . . . . .                        | 76        |
| 5.2.2. Homológ rekombináció . . . . .                                                               | 77        |
| 5.3. Sugárzás hatására kialakuló változások a sejtsztódás során . . . . .                           | 79        |
| 5.4. Sugárhatásra bekövetkező sejthalál . . . . .                                                   | 83        |
| 5.5. A sugárkárosodások típusai, a lineáris-kvadratikus modell sejtbiológiai alapjai . . . . .      | 89        |
| 5.6. Megosztott, időben elkülönült dózisok sejtpusztító hatása . . . . .                            | 91        |
| 5.7. A megosztott dózisok között eltelt idő szerepe a sejtek túlélésében . . . . .                  | 92        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                           | 95        |
| <b>6. Sugárvédő anyagok</b>                                                                         | <b>96</b> |
| 6.1. Antioxidáns hatással rendelkező, szabadgyök-fogó klasszikus sugárvédő vegyületek . . . . .     | 97        |
| 6.1.1. Amifosztin (WR2721, Ethylol) . . . . .                                                       | 98        |
| 6.1.2. Nitroxid alapú antioxidánsok . . . . .                                                       | 99        |
| 6.1.3. Szuperoxid-diszmutáz alapú génterápia . . . . .                                              | 99        |
| 6.1.4. Szelén . . . . .                                                                             | 100       |
| 6.1.5. Az egészséges szövetekben helyi hypoxiát okozó eljárások . . . . .                           | 100       |
| 6.2. A sugárzás hatásait mérséklő anyagok (sugárhatás gyengítők) . . . . .                          | 100       |
| 6.2.1. Hematopoetikus növekedési faktorok . . . . .                                                 | 102       |
| 6.2.2. Keratinocita növekedési faktor (KGF-1, palifermin) . . . . .                                 | 103       |

|           |                                                                                                                      |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.3.    | TGF- $\beta$ termelődés csökkentését célzó szerek . . . . .                                                          | 103        |
| 6.2.4.    | Egyéb sugárhatás gyengítők . . . . .                                                                                 | 104        |
|           | Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                            | 106        |
| <b>7.</b> | <b>Oxigén hatása a sejtek túlélésére, sugárérzékenyítő szerek, bioreduktív gyógyszerek</b>                           | <b>108</b> |
| 7.1.      | Az oxigén sugárérzékenyítő hatásának mechanizmusa . . . . .                                                          | 108        |
| 7.2.      | A sugárérzékenyítéshez szükséges oxigén koncentrációja és a szöveti hypoxia jelentősége a sugárterápiában . . . . .  | 110        |
| 7.3.      | A daganat oxigén ellátottságának a mérése . . . . .                                                                  | 112        |
| 7.3.1.    | Hypoxia mérése kísérleti tumorokban . . . . .                                                                        | 112        |
| 7.3.2.    | Hypoxia mérése humán tumorokban . . . . .                                                                            | 114        |
| 7.4.      | Reoxigenizáció . . . . .                                                                                             | 116        |
| 7.5.      | A daganat hypoxia szerepe a kemoterápiás szerekkel szembeni rezisztenciában . . . . .                                | 118        |
| 7.6.      | A hypoxia szerepe a daganatok progressziójában . . . . .                                                             | 118        |
| 7.7.      | Sugárérzékenyítő technikák és bioreduktív szerek . . . . .                                                           | 119        |
| 7.8.      | A sugárérzékenyítő terápiákat értékelő klinikai vizsgálatok összesítő metaanalízise . . . . .                        | 125        |
| 7.9.      | A daganat vérellátására ható terápiák . . . . .                                                                      | 126        |
| 7.10.     | Egyéb hatásmechanizmusú, sugárérzékenyítő vegyületek . . . . .                                                       | 127        |
|           | Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                            | 129        |
| <b>8.</b> | <b>Az ionizáló sugárzás genetikai és magzati hatásai</b>                                                             | <b>131</b> |
| 8.1.      | Az ivarsejteket ért sugárexpozíció következményei . . . . .                                                          | 131        |
| 8.1.1.    | Az ivarszervek, ivarsejtek sugárérzékenysége . . . . .                                                               | 132        |
| 8.1.2.    | Sugárzás indukálta genetikai károsodások gyakorisága . . . . .                                                       | 133        |
| 8.2.      | Az ionizáló sugárzás magzati hatásai . . . . .                                                                       | 139        |
| 8.2.1.    | A magzati sugárexpozíció determinisztikus hatásai . . . . .                                                          | 140        |
| 8.2.2.    | A méhen belüli élet során elszenvedett sugárexpozíció daganatkeltő hatása . . . . .                                  | 142        |
| 8.3.      | Esetleges javaslatok a terhes nőt ért sugárexpozíció kérdéskörére . . . . .                                          | 143        |
|           | Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                            | 145        |
| <b>9.</b> | <b>Akut sugársérülés emberben és állatkísérletes rendszerekben</b>                                                   | <b>148</b> |
| 9.1.      | Akut sugárbetegség . . . . .                                                                                         | 149        |
| 9.1.1.    | A cerebrovaszkuláris szindróma . . . . .                                                                             | 151        |
| 9.1.2.    | A gasztrointesztinális szindróma . . . . .                                                                           | 152        |
| 9.1.3.    | A hematopoetikus szindróma . . . . .                                                                                 | 154        |
| 9.1.4.    | Több szerv együttes funkcionális károsodásával járó szindróma (multiple organ dysfunction syndrome – MODS) . . . . . | 155        |

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.1.5. Bőrszindróma . . . . .                                                                                                            | 158        |
| 9.1.6. Az LD <sub>50</sub> érték, és az akut sugárbetegség prognózisát befolyásoló tényezők . . . . .                                    | 159        |
| 9.1.7. A sugárexpozíció mértékére utaló biológiai indikátorok (biológiai dozimetriai módszerek) . . . . .                                | 160        |
| 9.1.8. Az akut sugárbetegség kezelése . . . . .                                                                                          | 164        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                                | 175        |
| <b>10.A sugárhatásra kialakuló daganatok epidemiológiája, kialakulási mechanizmusa</b>                                                   | <b>176</b> |
| 10.1. Az ionizáló sugárzás daganatkeltő hatására vonatkozó epidemiológiai megfigyelések . . . . .                                        | 177        |
| 10.1.1. A hirosimai és nagaszaki atomtámadás következményei . . . . .                                                                    | 177        |
| 10.1.2. A daganat kialakulás kockázatának becslése sugárexpozíciót követően . . . . .                                                    | 183        |
| 10.1.3. A csernobili baleset következményei . . . . .                                                                                    | 183        |
| 10.2. Daganat kialakulás kockázata nukleáris létesítményekben dolgozóknál . . . . .                                                      | 186        |
| 10.3. Az orvosi sugárexpozíciók kockázata . . . . .                                                                                      | 187        |
| 10.3.1. A mammográfiás vizsgálatok lehetséges kockázatai . . . . .                                                                       | 187        |
| 10.3.2. A komputer tomográfiás (CT) vizsgálatok egészségügyi kockázatai . . . . .                                                        | 188        |
| 10.4. Sugárzás kiváltotta daganatok kialakulási mechanizmusa . . . . .                                                                   | 191        |
| 10.4.1. A daganatkeletkezés többlépcsős folyamat . . . . .                                                                               | 191        |
| 10.4.2. Onkogének és tumor szuppresszor gének károsodása sugárzás indukálta daganatokban . . . . .                                       | 191        |
| 10.4.3. Sugárzás hatására kialakuló genom instabilitás . . . . .                                                                         | 192        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                                | 194        |
| <b>11. Normálszövetek és daganatsejtek proliferatív szerveződése</b>                                                                     | <b>196</b> |
| 11.1. A normálszövetek sugárzásra adott válaszreakcióinak mérése, a sugárválaszt befolyásoló tényezők . . . . .                          | 197        |
| 11.1.1. A szövetek proliferatív szerveződésének a hatása a sugárhatásra kialakuló normálszöveti mellékhatásokra . . . . .                | 197        |
| 11.1.2. A besugárzott térfogat, a szövetek funkcionális szerveződésének a hatása a normálszövetekben kialakuló mellékhatásokra . . . . . | 202        |
| 11.2. Daganatok proliferatív szerveződése . . . . .                                                                                      | 204        |
| 11.2.1. A daganatok összetételét alkotó sejtek . . . . .                                                                                 | 205        |
| 11.2.2. A daganat növekedését befolyásoló tényezők . . . . .                                                                             | 206        |
| 11.2.3. A daganatok proliferatív szerveződésének meghatározására alkalmas paraméterek, eljárások . . . . .                               | 207        |
| 11.3. Összefoglalás . . . . .                                                                                                            | 210        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                                | 211        |

|                                                                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>12.A frakcionált sugárterápia sugárbiológiai alapjai, a lineáris-kvadratikus sugárhatás modell jelentősége, alkalmazása a sugárterápiában</b> | <b>212</b> |
| 12.1. A sugárzás biológiai hatásának vizsgálata a múlt században                                                                                 | 213        |
| 12.1.1. Kumulatív dózis válasz (Cumulative Response Dose, CRE)                                                                                   | 214        |
| 12.1.2. Orton-Ellis modell                                                                                                                       | 214        |
| 12.1.3. NSD, CRE klinikai alkalmazhatósága                                                                                                       | 214        |
| 12.2. Túlélő frakció                                                                                                                             | 215        |
| 12.2.1. Túlélő frakció (túlélő hányad) — Surviving Fraction – SF                                                                                 | 215        |
| 12.3. Target elmélet                                                                                                                             | 216        |
| 12.3.1. Single-target modell                                                                                                                     | 217        |
| 12.3.2. Multitarget modell                                                                                                                       | 218        |
| 12.4. Lineáris-kvadratikus (LQ) modell                                                                                                           | 219        |
| 12.4.1. Az LQ modell kiegészítése a teljes kezelési idő alatt jelenlévő hatásokkal                                                               | 222        |
| 12.4.2. Az $\alpha/\beta$ értékei                                                                                                                | 223        |
| 12.5. Hyperfrakcionált sugárkezelés                                                                                                              | 225        |
| 12.6. Dóziseloszlás inhomogenitásának figyelembe vétele                                                                                          | 227        |
| 12.7. Összefoglalás                                                                                                                              | 228        |
| Irodalomjegyzék                                                                                                                                  | 229        |
| <br>                                                                                                                                             |            |
| <b>13. Teleterápia sugárbiológiai hatásai</b>                                                                                                    | <b>232</b> |
| 13.1. Sugárterápiás kezelések jellemzői                                                                                                          | 232        |
| 13.2. Teleterápia fizikai alapjai                                                                                                                | 232        |
| 13.2.1. Fotonsugárzás jellemzői                                                                                                                  | 233        |
| 13.2.2. Elektronsugárzás jellemzői                                                                                                               | 238        |
| 13.3. Teleterápiás berendezések                                                                                                                  | 242        |
| 13.3.1. Terápiás röntgenkészülékek                                                                                                               | 242        |
| 13.3.2. Kobaltágyú                                                                                                                               | 243        |
| 13.3.3. Elektrongyorsítók (lineáris gyorsítók)                                                                                                   | 244        |
| 13.4. Képregisztráció folyamán bejelölendő térfogatok                                                                                            | 245        |
| 13.5. Besugárzástervezés                                                                                                                         | 248        |
| 13.6. Sugárterápiás tervek értékelése                                                                                                            | 251        |
| 13.6.1. Síkbeli és térbeli dóziseloszlások, izodózisgörbék elemzése                                                                              | 252        |
| 13.6.2. Dózis-térfogat hisztogram                                                                                                                | 253        |
| 13.6.3. A terveknél mért indexek                                                                                                                 | 255        |
| 13.6.4. Lokális tumor kontroll valószínűsége (TCP) és az egészséges szövet károsodásának valószínűsége (NTCP)                                    | 257        |
| 13.6.5. Lokális tumor kontroll valószínűségét (TCP) leíró matematikai modell                                                                     | 260        |
| 13.6.6. Egészséges szövet károsodásának valószínűségét (NTCP) leíró matematikai modellek                                                         | 262        |

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                            | 268        |
| <b>14. Az alacsony és magas dózisteljesítményű brachyterápia sugárbiológiai alapja</b>                                               | <b>271</b> |
| 14.1. Rövid történeti áttekintés . . . . .                                                                                           | 271        |
| 14.2. Brachyterápia alapfogalmai . . . . .                                                                                           | 272        |
| 14.2.1. A $\gamma$ -sugárforrások jellemzésére szolgáló paraméterek: . . . . .                                                       | 275        |
| 14.3. LDR brachyterápia . . . . .                                                                                                    | 279        |
| 14.4. Remote afterloading vagy távvezérléses utántöltéses technika . . . . .                                                         | 281        |
| 14.5. Minőségi indexek a brachyterápiában . . . . .                                                                                  | 284        |
| 14.6. Sugárbiológia szerepe a brachyterápiában . . . . .                                                                             | 285        |
| 14.7. HDR brachyterápia . . . . .                                                                                                    | 285        |
| 14.7.1. LDR brachyterápia sugárbiológiai hatása . . . . .                                                                            | 287        |
| 14.7.2. LDR brachyterápia permanens implantátumok segítségével . . . . .                                                             | 290        |
| 14.7.3. PDR brachyterápia sugárbiológiai hatása . . . . .                                                                            | 292        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                            | 294        |
| <b>15. Sugárterápia következtében kialakuló korai és késői mellékhatások</b>                                                         | <b>296</b> |
| 15.1. Különböző anatómiai régiók sugárterápia következtében kialakuló korai és kései mellékhatások . . . . .                         | 297        |
| 15.1.1. A bőr, mint védendő szerv korai és kései sugárkárosodása . . . . .                                                           | 297        |
| 15.1.2. Agytumrok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                                                            | 299        |
| 15.1.3. Fej-nyak tumorok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                                                     | 301        |
| 15.1.4. Tüdő tumorok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                                                         | 304        |
| 15.1.5. Emlő tumorok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                                                         | 307        |
| 15.1.6. Emésztő- és kiválasztó szervrendszeri tumorok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                        | 309        |
| 15.1.7. Nőgyógyászati tumorok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                                                | 315        |
| 15.1.8. prosztatata tumorok sugárkezelésének korai és kései mellékhatásai . . . . .                                                  | 316        |
| 15.2. Tolerancia dózisok meghatározása . . . . .                                                                                     | 318        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                            | 323        |
| <b>16. Eltérő frakcionálási sémák összehasonlíthatóságának és új sugárterápiás modalitások kialakításának sugárbiológiai alapjai</b> | <b>326</b> |
| 16.1. A frakcionált sugárterápia történelmi előzményei . . . . .                                                                     | 327        |
| 16.2. A sugárterápia hatásosságát befolyásoló sejt- és sugárbiológiai folyamatok                                                     | 328        |
| 16.2.1. A DNS hibajavító folyamatok eredményességének, gyorsaságának hatása a frakcionált sugárterápia hatásosságára . . . . .       | 330        |
| 16.2.2. A hypoxiás daganatsejtek re-oxigenizációja . . . . .                                                                         | 331        |
| 16.2.3. A sejtciklus egyes fázisai közti átrendeződés . . . . .                                                                      | 332        |

|                                                                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 16.2.4. A frakcionált sugárterápia időtartama alatt a normálszövetekben és a daganatokban bekövetkező fokozott repopuláció hatása . . . . .      | 332        |
| 16.3. Az új, frakcionált sugárterápiás protokollok kialakítását alapvetően befolyásoló sugárbiológiai tényezők . . . . .                         | 332        |
| 16.3.1. A frakciódózis hatása a normálszövetek és daganatok sugárválaszára                                                                       | 333        |
| 16.3.2. A terápia időtartamának hatása a normálszövetek és daganatok ionizáló sugárzás iránti válaszreakcióira . . . . .                         | 335        |
| 16.4. Hogyan válaszoljunk a sugárterápia során a nem várt okokból beiktatott szünetekre? . . . . .                                               | 338        |
| 16.5. Hogyan végezzük a sugárterápiát más onkoterápiás modalitásokkal való kombinációban? . . . . .                                              | 339        |
| 16.6. Összefoglalás . . . . .                                                                                                                    | 339        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                                        | 341        |
| <b>17. Hyperfrakcionált, hypofrakcionált és gyorsított sugárterápia, és részecske sugárzások alkalmazása daganatos megbetegedések kezelésére</b> | <b>343</b> |
| 17.1. Módosított frakcionálási sémák alkalmazása a sugárterápiában . . . . .                                                                     | 344        |
| 17.1.1. A hyperfrakcionált sugárterápia . . . . .                                                                                                | 344        |
| 17.1.2. A hypofrakcionált sugárterápia . . . . .                                                                                                 | 345        |
| 17.1.3. Gyorsított sugárterápia . . . . .                                                                                                        | 346        |
| 17.1.4. Folyamatos, hyperfrakcionált, gyorsított sugárterápia . . . . .                                                                          | 348        |
| 17.1.5. Gyorsított sugárterápia heti hat alkalommal, napi egy frakcióval végzett besugárzás esetén. . . . .                                      | 349        |
| 17.1.6. A módosított frakcionálási sémákkal végzett sugárterápiás kezelések eredményeinek összegzése . . . . .                                   | 350        |
| 17.2. Részecske sugárzások alkalmazása a sugárterápiában . . . . .                                                                               | 351        |
| 17.2.1. A nagy lineáris energia transzfer értékű sugárzások alkalmazásának sugárbiológiai előnyei . . . . .                                      | 351        |
| 17.2.2. Neutronsugárzás alkalmazása daganatos megbetegedések kezelésére                                                                          | 352        |
| 17.2.3. A bór neutron befogásán alapuló sugárterápia . . . . .                                                                                   | 354        |
| 17.2.4. Protonsugárzás alkalmazása a sugárterápiában . . . . .                                                                                   | 354        |
| 17.2.5. Nehéz ion sugárzások . . . . .                                                                                                           | 355        |
| 17.3. Összefoglalás . . . . .                                                                                                                    | 355        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                                                        | 356        |
| <b>18. Kombinált kemo- és sugárterápia sugárbiológiai hatása</b>                                                                                 | <b>360</b> |
| 18.1. A sugárterápia és kemoterápia között kialakuló kölcsönhatások molekuláris és celluláris alapjai . . . . .                                  | 365        |
| 18.1.1. Fokozott DNS károsodás és csökkent DNS hibajavítás (repair) . . . . .                                                                    | 365        |
| 18.1.2. Sejt-ciklus szinkronizáció . . . . .                                                                                                     | 366        |
| 18.1.3. Sejtosztódás gátlása . . . . .                                                                                                           | 366        |

|                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 18.1.4. Fokozott apoptózis . . . . .                                                                                  | 366        |
| 18.1.5. Módosult repopuláció . . . . .                                                                                | 367        |
| 18.2. A kombinált kemoterápia és sugárterápia mellékhatásai . . . . .                                                 | 367        |
| 18.2.1. Korai mellékhatások . . . . .                                                                                 | 367        |
| 18.2.2. Késői toxicitás . . . . .                                                                                     | 368        |
| 18.3. A kombinált sugárterápia és kemoterápia klinikai vonatkozásai . . . . .                                         | 368        |
| 18.3.1. Méhnyakrák . . . . .                                                                                          | 370        |
| 18.3.2. Agytumor . . . . .                                                                                            | 370        |
| 18.3.3. Fej-nyaki daganatok . . . . .                                                                                 | 372        |
| 18.3.4. Tüdődaganatok . . . . .                                                                                       | 373        |
| 18.3.5. Nyelőső daganatok . . . . .                                                                                   | 373        |
| 18.3.6. Végbél daganatok . . . . .                                                                                    | 374        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                             | 376        |
| <b>19. A sugárbiológiában alkalmazható tudományos módszerek az egyéni sugárérzékenységre</b>                          | <b>379</b> |
| 19.1. Az egyének sugárérzékenységében megnyilvánuló különbségek, az egyéni különbségek genetikai háttere . . . . .    | 380        |
| 19.2. Az egyéni sugárérzékenység mérésére alkalmazható eljárások . . . . .                                            | 382        |
| 19.2.1. Klonogén, vagy kolónia-képzőassay . . . . .                                                                   | 384        |
| 19.2.2. Lágy-agar teszt . . . . .                                                                                     | 384        |
| 19.2.3. Sejt-proliferációs vizsgálatok . . . . .                                                                      | 385        |
| 19.2.4. Mikronukleuszassay . . . . .                                                                                  | 386        |
| 19.2.5. Kromoszóma aberrációk mérése . . . . .                                                                        | 386        |
| 19.2.6. Egy-sejt elektroforézisassay . . . . .                                                                        | 387        |
| 19.2.7. A gén-expresszióban sugárhatásra bekövetkező változások mérése valós idejű polimeráz láncreakcióval . . . . . | 388        |
| 19.2.8. A sugárhatásra bekövetkező gén-expressziós változások mérése mikroarray segítségével . . . . .                | 388        |
| 19.3. Daganatos betegek egyéni sugárérzékenységére vonatkozó saját vizsgálatok és irodalmi adatok . . . . .           | 389        |
| 19.4. Az egyéni sugárérzékenység tanulmányozása mikroarray vizsgálatokkal . . . . .                                   | 392        |
| 19.5. Daganatok sugárterápiás válaszreakcióinak a becslése . . . . .                                                  | 395        |
| 19.6. Mellékletek . . . . .                                                                                           | 397        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                             | 404        |
| <b>20. Biológiailag effektív dózis (BED) alkalmazása a teleterápiában – számolási feladatok</b>                       | <b>408</b> |
| 20.1. Elmélet: BED számítása . . . . .                                                                                | 408        |
| 20.1.1. Feladatok . . . . .                                                                                           | 409        |
| 20.2. Elmélet: BED számítása időfaktorral . . . . .                                                                   | 421        |



|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 20.2.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 421        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                              | 426        |
| <b>21. Biológiai izoeffektív dózis (EQD<sub>2</sub>) számítása</b>                                                     | <b>429</b> |
| 21.1. Elmélet: EQD <sub>2</sub> . . . . .                                                                              | 429        |
| 21.1.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 430        |
| 21.2. Elmélet: inkomplett repair . . . . .                                                                             | 435        |
| 21.2.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 435        |
| 21.3. Elmélet: korrekciós dózis $\alpha/\beta$ ismerete nélkül . . . . .                                               | 437        |
| 21.3.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 439        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                              | 442        |
| <b>22. Brachyterápia sugárbiológiai hatásai – számolási feladatok</b>                                                  | <b>445</b> |
| 22.1. Elmélet: HDR brachyterápia . . . . .                                                                             | 445        |
| 22.1.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 446        |
| 22.2. Elmélet: LDR brachyterápia – folyamatos dózisleadás . . . . .                                                    | 451        |
| 22.2.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 453        |
| 22.3. Elmélet: LDR kezelés átalakítása biológiailag ekvivalens HDR kezeléssé a<br>Liversage-egyenlet alapján . . . . . | 459        |
| 22.3.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 460        |
| 22.4. Elmélet: LDR brachyterápia permanens implantátumokkal . . . . .                                                  | 461        |
| 22.4.1. Feladatok . . . . .                                                                                            | 462        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                                                              | 464        |
| <b>23. Protonterápia sugárbiológiai hatásai</b>                                                                        | <b>466</b> |
| 23.1. Protonterápia rövid történeti áttekintése . . . . .                                                              | 466        |
| 23.2. A protonterápia fizikai alapjai . . . . .                                                                        | 467        |
| 23.2.1. Proton kölcsönhatása az anyaggal . . . . .                                                                     | 467        |
| 23.3. Gyorsítók . . . . .                                                                                              | 470        |
| 23.3.1. Ciklotron . . . . .                                                                                            | 470        |
| 23.3.2. Szinkrotron . . . . .                                                                                          | 474        |
| 23.4. Szállítási rendszer . . . . .                                                                                    | 476        |
| 23.4.1. Passzív széles szórt nyaláb technika . . . . .                                                                 | 476        |
| 23.4.2. Aktív, keskeny pásztázó (szkennelt) nyaláb technika . . . . .                                                  | 478        |
| 23.5. Proton specifikus besugárzástervezés . . . . .                                                                   | 480        |
| 23.5.1. Passzív széles nyalábú technika esetén alkalmazott standard besu-<br>gárzástervezés . . . . .                  | 480        |
| 23.5.2. A pásztázó (szkennelt) keskeny nyaláb technika és intenzitásmodu-<br>lált protonterápia . . . . .              | 482        |
| 23.5.3. Betegpozicionálás és rögzítés . . . . .                                                                        | 482        |
| 23.6. A nehéz ion és protonterápia sugárbiológiája . . . . .                                                           | 482        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 23.6.1. Másodlagos sugárzás . . . . .                                    | 484        |
| 23.7. Az LQ modell alkalmazása a nehéz ion és protonterápiában . . . . . | 484        |
| 23.8. Feladatok . . . . .                                                | 486        |
| Irodalomjegyzék . . . . .                                                | 489        |
| <b>24. Tesztsorok</b>                                                    | <b>492</b> |
| 24.1. Sugárbiológia teszt kérdések I. . . . .                            | 492        |
| 24.2. Sugárbiológia tesztkérdések II. . . . .                            | 496        |
| 24.3. Sugárbiológia tesztkérdések III. . . . .                           | 500        |
| 24.4. Megoldások . . . . .                                               | 504        |
| <b>25. Meghatározások</b>                                                | <b>505</b> |

# Bevezető

A „Sugárbiológia” elektronikus tankönyv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technika Karán a Fizikus MSc képzés, orvosi fizika hallgatóinak „Sugárbiológia” tárgyához készült, de haszonnal forgathatják más műszaki vagy egészségügyi főiskolák, egyetemek hallgatói is.

A könyv áttekintést ad az ionizáló sugárzások az élő szervezetre gyakorolt károsító hatásáról. Röviden bemutatja a sugárzások fizikai, kémiai és biológiai hatásait. Taglalja a sugárzások rákgyógyításban betöltött szerepét, a gyors technológiai fejlődés adta lehetőségek alkalmazását és az emberi szervezet daganatos és egészséges szöveteire kifejtett sugárbiológiai hatását. A mintegy 450 oldalas elméleti anyagot kiegészíti az 50 példát tartalmazó példatár, amely többségében megoldott, tematizált gyakorlófeladatokat tartalmaz. Az eligazodást tartalomjegyzék, valamint a könyv végén található „Meghatározások” fejezet segíti. A megértést színes ábrák, animációk és mozgókép könnyítik.

Készült a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0064 számú, a „Matematikai és fizikai képzés a természettudományos, a műszaki és az informatikai felsőoktatásban” című projekt keretében 2013-ban. A most megjelenő változat az előbbieken említett mű javított, átdolgozott kiadása.