

Dr. Strádi Andrea*

Személyi dozimetria extrém környezetben

Az egészség védelme szempontjából elsődleges fontosságú, hogy a munkájuk jellegéből fakadóan testi épségükben potenciálisan veszélyeztetett dolgozókat biztosítani lehessen arról, hogy szolgálatukat követően is teljes életet élhessenek. Honvédelmi megbízatást teljesítő személyek esetében mindez egyértelmű és kiemelten lényeges feladat. Az atombomba kifejlesztése óta egy, a vegyi fegyverekhez hasonló, mégis más jellegű fenyegetés került előtérbe, az ionizáló sugárzás. Lévéen a veszély emberi érzékszerveink számára megfoghatatlan és csak nagy dózisonknál fellépő akut sérülés esetén észlelhető azonnal, a védelem különleges elővigyázatosságot, ezzel együtt folyamatos dozimetriai megfigyelést igényel. Napjainkban már kisebb valószínűséggel fenyeget a tömegpusztító fegyverek bevetése, emellett azonban számolni kell az – egyébként ritka – ipari nukleáris katasztrófákból eredő veszélyekkel is. Ennek megfelelően az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény előírja, hogy nukleárisbaleset-elhárítás időszakára a veszélyhelyzeti és foglalkozási sugárdózis-mérés módszereit kell alkalmazni a baleset-elhárításban résztvevő személyi állományra. Az ilyen extrém szituációk gyakorisága viszonylag kicsi, azonban a potenciális között dózis jelentős lehet. Ezzel szemben a nukleáris létesítményekben vagy az orvosi diagnosztika és terápiás kezelés terén dolgozók, valamint a természetes forrásokból eredő sugárterheléssel járó tevékenységekben résztvevő személyter kisebb dózisoknak van kitéve, azonban jóval hosszabb időtávon, így esetükben is indokolt a rendszeres dózismérés. Természetes eredetű sugárzásnak kitétt munkahelyek például a földfelszín alatti védett objektumok, illetve az olyan felszíni területek, amelyek közelében természetes radioaktív izotópokat tartalmazó kőzetek és egyéb anyagok feldolgoása vagy az előállított termékek tárolása történik. Nem elhanyagolható ezen felül a nagy távolságon és magasságban utazó légi személyzet kitétsége a kozmikus sugárzás hatásainak, különösképpen a magasabb földrajzi szélességeken. Ez utóbbi tevékenység szélsőséges esete az űrutazás. A kihívás jellegének megfelelően az űrkorszak kezdetén kizárólag katonai szolgálatot teljesítő személyeket alkalmaztak legénységnek, így a NASA által a Mercury programba kiválasztott első asztronauták is mind a légi bérépülőpilótái voltak. A sűrű alsó légkör védel-

mét elhagyva az űrhajósok a magasság növelésével egyre nagyobb sugárdózisnak vannak kitéve. Sugárvédelmi szempontból manapság leginkább az űrállomások legénysége a veszélyeztetett, hiszen hosszabb időtávon a földi háttérnél akár 100-szor nagyobb dózis is érheti őket, ezért fokozott figyelmet érdemel a dózismérés. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk az ionizáló sugárzás űrbéli forrásait, valamint az alkalmazott személyi dozimetriai módszereket, különös tekintettel a téma magyar vonatkozásaira.

Habár a kozmikus sugárzás nagyrészt protonokból áll, a Föld körüli térség sugárzási viszonyai mind térben, mind időben meglehetősen összetettek. Az ún. galaktikus kozmikus sugárzás forrásai a Naprendszeren kívül található (szupernóvák, aktív galaxismagok, kvazárok), így eloszlása megközelítőleg homogén és izotróp. Nagyrészt elektronjaiktól megfosztott atommagokból tevődik össze, amelyek közel fénysebességgel haladnak az űrben és jelentős áthatóképességgel bírnak. Az elsődleges ionizáló képességükön túl ezek a részecskék nagymennyiségű másodlagos sugárzás létrehozására képesek, és e magreakciók során keletkeznek a másodlagos neutronok is. Az űrbéli sugárzás másik forrása a Nap. A szoláris eredetű töltött részecskék árama szüntelenül bombázza a bolygót, a periodikusan változó napciklus aktuális erősségétől függő intenzitással (ábra a belső borítón alul). Ezeket a részecskéket a Föld mágneses tere befogja és eltéríti, védelmet biztosítva ezzel a felszínen élők számára. Azonban a világűrbe kilépve, és megközelítve az így létrejött sugárzási öveket, jelentős többletdózissal kell számolni. A mágneses erővonalak a pólusok felé sűrűsödnek és a Föld középpontja felé hajlanak, ezért a magasabb földrajzi szélességeken már kisebb repülési magasságnál is mérhető a befogott részecskéktől származó dóziszárulék. Mindemellett ismert, hogy a Föld mágneses és forgástengelye nem esik egybe, ezért jött létre a pólusoktól távol az úgynevezett dél-atlanti anomália térsége, ahol a felszín felé egészen 200 km magasságig benyúlik a befogott protonokból álló belső sugárzási öv.

A széles energiatartományt átívelő, változó lokális összetételű kozmikus sugárzás elleni védekezés komplex feladat és a várható egészségügyi kockázatok miatt kiemelt fontossággal bír. Az űrhajós szöveteiben a sugárzás hatására reaktív köztitermékek (szabadgyökök) keletkeznek, de a

ÖSSZEFOGLALÁS: Miként a mesterséges, úgy a természetes forrásból származó ionizáló sugárzások elleni védelem is kiemelten fontos feladat, különösképpen a sugárterheléssel járó munkát végző személyek esetében. E tekintetben az űrhajósok igazán extrém körülmények között dolgoznak, ahol a folyamatos dózismérés egészségük védelme szempontjából elengedhetetlen. A magyar kutatók által kifejlesztett és méltán híressé vált Pille dózismérő rendszer már több mint 35 éve áll a sugárvédelem szolgálatában. Ezt az örökséget tekintjük át a múlttól a jelenig, kiegészítve más dozimetriai technikákkal, valamint kitekintve a jövő igényei felé.

KULCSSZAVAK: űrhajózás, dozimetria, kozmikus sugárzás, Pille

ABSTRACT: The protection against ionizing radiation is very important, whether it originates from artificial or natural sources. Personal dosimetry is a priority task in case of occupational hazard and in this regard the astronauts are working in an extreme environment, where the continuous dose measurements are essential in terms of protecting their health. The well-known Pille dosimetry system, developed by Hungarian researchers, has been serving the radiation protection of astronauts for more than 35 years. This heritage will be overviewed from the past to the present, complimented by other dosimetric techniques and some future outlook.

KEY WORDS: astronautics, dosimetry, cosmic rays, Pille

* Dr. Strádi Andrea PhD, Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont, Űrdozimetriai Kutatócsoport



nagy energia-leadással bíró részecskék közvetlenül is ionizálni képesek a sejtmembránt alkotó molekulák és a sejt-magban található DNS atomjait is. Mindez megnöveli a rosszindulatú daganatos betegségek kialakulásának esélyét, emellett hatást gyakorol a központi idegrendszerre és a vérkeringésre, de akár örökletes elváltozást is okozhat. A leginkább sugár-érzékeny egységek a gyorsan szaporodó vérképzősejtek és a szemlencse. Miként a földi környezetben sugárveszélyes munkakörben dolgozó személyek esetén, úgy az európai és amerikai asztronautáknak, az orosz kozmonautáknak és a kínai taikonautáknak is meghatározott dóziskorlátan belül engedélyezett a szolgálat. Esetükben egy úgynevezett karrierdózist határoznak meg, amely a rosszindulatú daganat kialakulásának kockázatát maximálisan 3%-kal növeli. Ennek elérését követően az adott személynek nem engedélyezhetnek további űrpülést.

A gyakorlatban különféle dózismérőket alkalmaznak annak regisztrálásához, hogy mekkora terhelést kapnak a sugárveszélyes környezetben dolgozók. Az űrhajózásban használt első doziméterek magemulziót tartalmaztak (zselatinban oldott kristályos ezüst-bromid vagy ezüst-jodid), amelyeket fotográfiai lemez készítéséhez használtak. Az emulzió áthaladó töltött részecskék pályája mentén fém-ezüst válik ki, ami előhívást követően fekete nyomként lesz látható. A nyomszám a dózissal arányos és ez utóbbit a megfelelő előzetes kalibráció segítségével kiszámíthatjuk. Hasonló nyomsűrűség-dózis összefüggésen alapul a szilárdtest nyomdetektorokkal történő mérés. A vékony, átlátszó műanyag lapkán áthaladó részecske a polimer anyagában okoz roncsolást, majd a rombolt zónákat kémiai módszerrel (lúgban történő maratással) fénymikroszkóppal is észlelhető méretre lehet kitágítani és optikailag vizsgálni (1. ábra). Az említett két eljárás a passzív dozimetriai módszerek közé sorolható, mivel a dózis regisztrálásához ezek az eszközök energiaellátást nem igényelnek. Egy másik, igen gyakran alkalmazott passzív technika alapja a termolumineszcencia jelensége. Ionizáló sugárzás hatására bizonyos típusú kristályokban az elektronok gerjesztődnek, majd csapdába kerülnek, de melegítés hatására képesek visszatérni az alapállapotba, miközben fényt (fotonokat) bocsátanak ki. A fénykibocsátás jól mérhető és arányos az elnyelt dózissal. A termolumineszcens doziméterek nagy előnye, hogy hőkezelést követően újra felhasználhatók. Ezen a jelenségen alapul az 1970-es években, a Központi Fizikai Kutatóintézetben (jelenleg MTA Energiatudományi

1. ábra. A Nemzetközi Űrállomáson kozmikus sugárzásnak kitétt egyik szilárdtest-nyomdetektor mikroszkópos képe (Forrás: MTA EK)



2. ábra. Farkas Bertalan demonstrálja a Pille használatát a Szaljut-6 űrállomáson (Forrás: MTA EK)



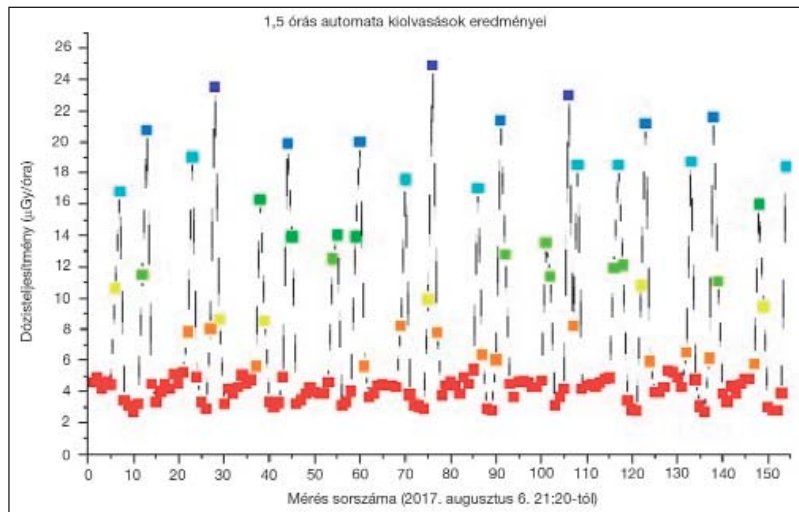
3. ábra. A Pille kiolvasó egység és dózismérő (Forrás: MTA EK)

Kutatóközpont, MTA EK) kifejlesztett Pille dozimetriai rendszer, amelynek első példányát 1980-ban Farkas Bertalan magyar űrhajós vitte fel a Szaljut-6 űrállomásra (2. ábra). 1983-ban a Pille egy újabb változatát feljuttatták a Szaljut-7-re, és azt követően – a kínai kísérleti űrállomáson kívül – az összes űrállomás fedélzetére. A rendszer doziméterkulcs(ok)ból és a fedélzeti kiolvasóegységből épül fel (lásd a 3. ábrát). A kulcs belsejében egy levákuumozott üvegcsőbe zárva, vékony fémlapokra speciális üveggel ráragasztott termolumineszcens kristályszemcsék vannak. Ezek a szemcsék a látható fényre is érzékenyek, ezért az üvegburát fényzáró tok veszi körül, amely a kiolvasóba behelyezve majd elforgatva a dozimétert a látható fotonok számára átjárhatóvá teszi. A kiolvasás során a fémlapokára, amelyre a kristályszemcsék rögzítve vannak, feszültséget kapcsolnak, és ez felfűti a termolumineszcens anyagot. A melegítés hatására fotonok lépnek ki a kristályból, amelyeket a beépített fotoelektron-sokszorozóval mérhetünk. A kulcsszerű dózismérő egy memóriachipet is tartalmaz, amellyel azonosíthatók az adott dózismérő specifikus tulajdonságai, például, hogy milyen kifűtési és kiértékelési programra van szükség a kiolvasásához, és milyen az egyedi érzékenysége. A Pille modern változatában digitálisan vezérelt a kifűtés, a nagyfeszültség, a jelfeldolgozás és az adattárolás is. A dózismérő kiolvasását követően az eszköz kijelzőjén leolvasható a mért érték, ezen felül a memóriakártyán további számos adat, mint pl. a legutóbbi kiolvasás óta eltelt idő és a dózisteljesítmény is rögzítésre kerül. Az előre programozható kifűtés beállítása lehetővé tette a dózisteljesítmény közelítő időprofiljának meghatáro-

zását operátori közreműködés nélkül, ami azért lényeges, mert az űrállomáson az eszközre fordítandó űrhajós-idő az alkalmazás legfontosabb korlátozó tényezője. Lényeges emellett az adott eszköz tömege is, hiszen az űrállomásra való feljuttatás költsége ettől függ. A Pille rendszer igen kis tömegű, kiolvasó egysége mindössze 1,4 kg és meglehetősen kompakt: 70 mm magas, 190 mm hosszú és 120 mm mély, fogyasztása pedig még a néhány tíz másodpercet igénylő kiolvasás közben is csak 7 W. A 20 mm átmérőjű és 60 mm hosszú doziméterek tömege az alumínium védőkupakkal együtt 70 g.

A Pillét a Nemzetközi Űrállomásra az első legénységcsere és egyben a Discovery űrrepülőgép 29. repülése alkalmával, 2001-ben vitték fel először. Kezdetben a különböző modulokban kialakuló sugárzási tér területi eloszlásának vizsgálatához használták, majd 2003-tól egy következő változat az orosz szegmens szolgálati dozimetriai rendszerének része lett. A nagyjából 400 km-es magasságban keringő űrállomáson a dózistérképezés mellett mind a mai napig űrséták alkalmával használják a Pille kulcsokat. Az alkalmazott diszpróziummal szennyezett kalciumsulfát ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) termolumineszcens kristályok érzékenysége lehetővé teszi azt is, hogy akár óránként kiértékeljék, ezért egy kulcsot folyamatosan a fedélzeti kiolvasóban tartanak, amit minden egyes keringési periódus megtétele után automatikusan kiolvasnak. Ennek segítségével egy teljes pályára vonatkozó háttérdozist tudnak meghatározni. Az egyes detektorok érzékenységében esetlegesen bekövetkezett változások ellenőrzésére rendszeres időközönként végeznek fedélzeti összeméréseket, amelyek során egymáshoz közel helyezik el az összes dozimétert, majd azonos mérési időt követően értékelik ki azokat.

Személyi dozimetriai célokra a különböző űrugynökségek más-más dózismérőket használnak, és mivel az űrbéli sugárzási viszonyok igen összetett teret hoznak létre, ezért csak többféle, különböző energiatartományokban érzékeny doziméterrel lehetséges a pontos mérés. A termolumineszcens dózismérők főként gamma-sugárzás, elektronok és bizonyos energiatartományon belül protonok mérésére alkalmasak. A kozmonauták által folyamatosan viselt dozimétercsomag termolumineszcens detektorok mellett nyomdetektorokat is tartalmaz, amelyek más (nagyobb) energialeadást képviselő részecskékre érzékenyek. Kiértékelésükben az Orosz Tudományos Akadémiával együttműködésben éveken keresztül az MTA EK Űrdozimetriai Kutatócsoportja is részt vett. A korábbiakban már említett módon kialakuló nyomok kvantitatív mérésén túl a különböző geometriai paraméterek rögzítésével meghatározható az eredeti részecske anyagban megtett útja során leadott energia, ezáltal akár a részecske típusa is. Ezen detektor-típus protonok, alfa-részecskék mérésére, valamint nagy áthatolóképességű kozmikus részecskék és neutronok által keltett fragmentumok regisztrálására alkalmas. A nyomszámolás optikai mikroszkóphoz csatolt kamerával, számítógépen keresztül, egy speciális képfeldolgozó szoftver segítségével történik. Mint minden mérési módszer esetében, a nyomdetektoroknál is elengedhetetlen a pontos kalibráció, amelyet nemzetközi kooperációban, különböző laboratóriumok részecskegyorsító berendezéseinél folytatnak a kutatók.

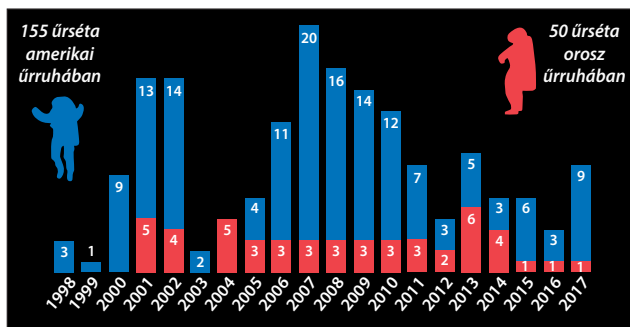


4. ábra. A dél-atlanti anomáliát átszelő és az azt elkerülő pályák dózisterhelésének összehasonlítása a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén végzett, másfél óránkénti automata Pille kiolvasások alapján, amelyek közel egy hónapot fednek le. A piros négyzetek az anomália térségén kívül regisztrált dózisteljesítmények, további színekkel pedig a térség átszelésekor mérhető értékeket jelöltük (Forrás: MTA EK)

Természetesen minden doziméter típusnak megvan a maga előnye, illetve hátránya. A Pille rendszer sikerének az egyik titka, hogy kifejezetten egyszerű a kezelése és dózismérői egy űrsétát követően azonnal kiolvashatók, így rögtön tudható, hogy mekkora dózisnak tette ki magát a személyzet. Ezenkívül a fedélzetén keringési pályánként végzett mérések lehetőségét biztosítanak a dél-atlanti anomáliát átszelő és az azt elkerülő pályák dózisterhelésének összehasonlítására is. A különbség szembetűnő. A diagramon látható, hogy (az átszelés földrajzi helyétől függően) négyszer, de akár ötször akkora dózisteljesítményt lehet regisztrálni az anomáliát érintő pályán, mint azon kívül (4. ábra). A rendszer hátránya azon túl, hogy csak egy bizonyos energiatartományon belül képes detektálni az, hogy a kiolvasáshoz folyamatos energiaellátás szükséges. Az aktív, félvezető- vagy proporcionális számláló-alapú doziméterekhez képest időben eltolva értesül az űrhajós az őt ért terhelésről, mivel maga a doziméter-kulcs csak gyűjti az információt, de nem jelzi ki. Hasonló nehézség adódik a nyomdetektorok esetében is, ahol az időfelbontás még durvább, csupán a teljes küldetésre vonatkozó, kumulált dózis meghatározása lehetséges. Azonban lévén kiértékelésük a földi laboratóriumban történik, az űrállomáson semmilyen speciális feltétel nem szükséges az egyébként olcsó, kisméretű és tömegű nyomdetektorok bevetéséhez.

Az űrséták a Nemzetközi Űrállomás karbantartása és a külső platformon lévő kísérleti berendezések kezelése szempontjából, feltétlenül szükségesek. 1998 óta 205 ilyen sétát, úgynevezett EVA-t (extravehicular activity) hajtottak végre, kevés kivétellel mindegyik küldetés során legalább egyszer. Speciálisan erre a feladatra az amerikai és az orosz fél is külön űrruhát fejlesztett ki. Nemcsak a mikrometeoritok elleni védekezés, az oxigénellátás és a megfelelő nyomás tartása elengedhetetlen, de az extrém hőmérsékleti szélsőségekkel szemben is meg kell védeni a viselőt. Az árnyékból a napsugárzásra átlépvén ugyan nagyjából mínusz 120 °C-ról plusz 130 °C fölé nőhet a hőmérséklet. Annak érdekében, hogy a személyzetet az átlagosan 5 és 7 óra közötti időtartamban elvégzendő külső munkák közben megvédje a ruházat, rengeteg különféle anyagból összeállított, rétegelt szövetet alkalmaznak, amely még egy vízűtéses belső részt is





5. ábra. Amerikai és orosz űrruhákban végzett űrséták száma a Nemzetközi Űrállomáson, az űreszköz összeszerelésétől kezdődően napjainkig (Forrás: NASA, magyar szöveg: a szerző, grafika: Dely Luca Réka)

tartalmaz. Mindez a kozmikus sugárzás bizonyos komponensei ellen is védi az űrhajóst, azonban még így is jelentős többletdózissal jár kilépni az állomás falai mögül (ábra a belső borítón felül). A Pille dozimétert az űrséta során ezen a ruházaton egy zsebben tárolják. Érdemes megjegyezni, hogy az amerikai EVA-kat úgy tervezik meg, hogy kifejezetten az űrállomás sugárzási anomáliát elkerülő pályáin hajtsák azokat végre. Ezzel szemben az orosz űrsétáknál ezt nem tudják kivitelezni, mert az oroszországi állomásokkal való közvetlen földi kapcsolat fenntartása miatt kénytelenek az anomáliát átszelő pályán is végezni a külső munkákat. A fentiekből adódó különbség jól megfigyelhető: a fedélzeten mért háttérhez képest a kozmonauták Pilléje több, mint 10-szeres dózist is regisztrálhat, miközben az amerikai űrhajósok doziméter-kulcsa 2–4-szeres növekményt mutat.

A legtöbb űrhajós karrierje során csak egyszer vagy kétszer jár a világűrben, de természetesen vannak rekor-

derek is, akik öt vagy hat alkalommal repülhettek, mint Gennagyij Padalka vagy Jurij Malencsenko kozmonauták, akik egyenként több mint 800 napot töltöttek különböző űrállomásokon. Esetükben valószínűsíthető, hogy a megengedett karrierdózist megközelítő sugárterhelésnek voltak kitéve. A jövőben különösen nagy kihívást jelent majd a Mars-utazás, ugyanis eltávolodva a Föld mágneses terének védelmétől, a hosszú küldetés során akár meg is haladhatja az űrutazókat érő sugárdózis az eddig felállított határértékeket. Annak érdekében, hogy biztosítható legyen az űrhajósok számára a megfelelő védelem, rendszeres visszajelzést kell kapniuk az őket érő veszélyekről. Belátható tehát, hogy a jelen és a jövő emberes űrutazásaihoz elengedhetetlen kiegészítő a személyi doziméter, ezért a Pille rendszer fejlesztése is folyamatban. A legutóbbi újításoknak köszönhetően kisebb önárvénykelással bíró dózismérőket készítettek a kutatók, ami lehetővé teszi, hogy még érzékenyebb és pontosabb méréseket végezzünk.

Kicsit kitekintve elmondható, hogy nemzetközi viszonylatban egyre inkább az aktív dózismérőket preferálják az azonnali információ kinyerésének igénye miatt. Ezért a nyomdetektoros technika kiszorulóban van az űrkutatás piacáról, de megbízhatósága és robusztussága miatt földi alkalmazása töretlen. A Pille tulajdonképpen félig aktív műszernek tekinthető, mert a sugárzás detektálása ugyan passzív módon történik, de a kiolvasás rövid időn belül, helyben elvégezhető az aktív kiolvasó berendezéssel, és jelenleg ez az egyetlen rendszer, amellyel termolumineszcens dózismérők a fedélzeten kiértékelhetők. Biztonsággal állítható tehát, hogy egyedi tulajdonságainak, történelmi jelentőségének és megbízható működésének köszönhetően a Pille még hosszú ideig szolgálja majd az űrhajósok egészségének védelmét.

Brandt Gyula

Magyar felségjelű Mi-24 harci helikopterek

A Zrínyi Kiadó 2017-ben jelentette meg *Brandt Gyula: Magyar felségjelű Mi-24 harci helikopterek – Mi-24 attacks helicopters with hungarian insignia* című könyvét. Ez a kötet – magyar és angol nyelven – mindent tartalmaz, amit a negyven magyar Mi-24-es harci helikopterről tudni érdemes. Ez a páncélozott harci helikopter nagy tűzerejű fegyverzetével döntő mértékben befolyásolhatja a fegyveres küzdelem kimenetelét azáltal, hogy a szárazföldi csapatok számára közvetlen légi támogatást nyújt, illetve páncélozott harcjárműveket pusztít. A sokoldalú Mi-24-es helikopter ugyanakkor lövészkatonák szállítására alkalmas deszanttérral is rendelkezik. A kötethez dr. Orosz Zoltán altábornagy, a Magyar Honvédség vezérkarfőnökének helyettese, korábbi helikopterpilóta írt méltó előszót. Album, műszaki leírás és egyben almanach ez a könyv, amely remek olvasmány lehet gyűjtőknek, modellezőknek és a repülés iránt érdeklődőknek egyaránt. A szerző hivatásos tisz, helikopterpilóta, aki 34 éves szolgálati ideje alatt, mintegy 3500 órát töltött levegőben szállítóhelikopteren repülve. A műszaki leírások mindenki számára érthető nyelvezetűek, és mellettük részletes magyarázatokat közöl a kötet. Az album nagy számban tartalmaz színes ábrákat és táblázatokat, illetve repülőkatonák által felelevenített történeteket is. A könyvből megismerhető a típus fejlesztésének és alkalmazásának története, illetve hazai útja az MN 87. Harcihelikopter Ezredtől a Bakony Harcihelikopter Ezredre át, az MH 86. Szolnok Helikopter Bázisig. Érdekfeszítő a magyar afganisztáni misszió ismertetése is. A könyv megjelenésének különös aktualitást ad, hogy a Magyar Honvédség felújított és ismét üzembe állít 12 db Mi-24-es harci helikoptert.



A 312 oldalas, keménytáblás, mintegy 240 db színes fekete-fehér fotóval illusztrált könyv 8400 Ft-os áron kapható a könyvesboltokban, illetve közvetlenül a Zrínyi Kiadónál is, 20%-os helyszíni kedvezménnyel. (Cím: 1087 Budapest, Kerepesi út 29/b., Tel.: 06 1 459 5373, e-mail: gyoredina@armedia.hu).