

Horváth János,¹ Horváth Zsuzsa²

Bolygóvédelem és NEO-kockázatok

Az Apophis aszteroida helye a Torino-,
Palermo- és CIRAS-skálán

Planetary Defence and NEO Risks

The Place of the Apophis Asteroid on the Torino, Palermo,
and CIRAS Scales

Absztrakt

A cikk a földközeli objektumok (near earth objects, NEO) becsapódási kockázatának értékelési módszereit mutatja be, különös tekintettel az Apophis aszteroidára, amely a bolygóvédelem egyik aktuális kihívása. Először ismertetjük a hagyományos Torino- és Palermo-skálákat. Majd bevezetni javaslunk egy kozmikus becsapódás kockázatbecslő skálát: a „Cosmic Impact Risk Assessment Scale” (CIRAS) skálát, amely hét kulcsfontosságú tényező – energia, becsapódási valószínűség, hátralévő idő, becsapódási helyszín, atmoszferikus hatás, másodlagos veszélyek és elhárítási nehézség – integrált értékelésével finomítja a kockázat meghatározását. Az Apophis aszteroida 2029-es földközelsége kivételes példaként szolgál, hiszen a kezdeti, bizonytalan pályaadatok magas kockázatot sugalltak, míg a legfrissebb mérések a szinte elhanyagolható ütközési esélyt mutatják. A skálák kombinált alkalmazása nem csupán a kockázatok átláthatóbb kommunikációját teszi lehetővé, hanem támogatja a célzott bolygóvédelmi stratégiák kialakítását is. Az új megközelítés révén megbízhatóbb előrejelzések készíthetők, amelyek hozzájárulhatnak a társadalmi és technológiai felkészültség javításához, valamint a potenciális veszélyek időben történő felismeréséhez. A részletes, többdimenziós kockázateértékelés hozzájárulhat a gyors reagáláshoz és a megelőző intézkedések megtételéhez, így biztosítva a Föld (lakóinak) biztonságát a kozmoszból érkező potenciális veszélyekkel szemben. Ez a megközelítés új távlatokat nyithat a planetáris védelem területén.

¹ Cégvezető, Visionary Tech & Event Solutions, e-mail: horvath_janos@visionarytecheventsolutions.com

² Oktató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem RTK Katasztrófavédelmi Intézet Tűzvédelmi Műszaki Tanszék, e-mail: horvath.zsuzsanna@uni-nke.hu

Kulcsszavak: bolygóvédelem, földközeli objektumok, Torino-skála, Palermo-skála, kockázatértékelés, ütközési valószínűség, energiafelszabadulás, planetáris védelem, multidimenziós kockázati index

Abstract

The paper introduces evaluation methods for the impact risk of near-Earth objects (NEOs), with a particular focus on the Apophis asteroid – a prime example of the current challenges in planetary defence. The paper explains the workings of the traditional Torino and Palermo scales. Additionally, the Cosmic Impact Risk Assessment Scale (CIRAS) is introduced, which refines risk assessment by integrating seven key factors – energy, impact probability, remaining time until impact, impact location, atmospheric effects, secondary hazards, and mitigation difficulty. The close approach of Apophis in 2029 serves as an exceptional case study. While the initial uncertain orbital data suggested a high risk, the most recent measurements indicate an almost negligible chance of collision. The study emphasises that the combined use of these scales not only allows for clearer communication of risks but also supports the development of targeted planetary defence strategies. This new approach enables more reliable forecasts, contributing to improved social and technological preparedness as well as the timely detection of potential hazards. Overall, the research underlines the importance of detailed, multidimensional risk assessments that facilitate swift responses and the implementation of preventive measures, thereby ensuring Earth's safety against potential cosmic threats. This approach opens new horizons in the field of planetary defence.

Keywords: Planetary defence, Near-Earth Objects, Torino Scale, Palermo Scale, risk assessment, impact probability, energy release, planetary defence, multidimensional risk index

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben a földközeli objektumok (*near-earth objects*, NEO) kutatása³ a bolygóvédelem és az űrkutatás egyik meghatározó területévé vált. Ezenkívül a földi infrastruktúra és ipari létesítmények védelme⁴ is egyre nagyobb figyelmet kap a veszélyes objektumok potenciális becsapódásai kapcsán. A földközeli objektumok közé olyan aszteroidák és üstökösök tartoznak, amelyek pályája a Földhöz veszélyes közelségbe kerülhet, és potenciális ütközés lehetőségét jelenti (1. ábra). A történelem során több példa is bizonyította már a becsapódások katasztrófális hatásait – elég csak a Tunguz-eseményre (1908), a cseljabinszki becsapódásra (2013), vagy akár a dinoszauruszokat kipusztító K-T határhoz tartozó Chicxulub-eseményre gondolnunk.

³ Lásd: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>; <https://neo.ssa.esa.int/>; KERESZTÚRI-SÁRNECZKY 2023.

⁴ PALLAGI 2023; ÉRCES-VASS 2018.



1. ábra: Fantáziarajz aszteroidabecsapódásról

Forrás: a szerzők szerkesztése

Már több olyan skála látott napvilágot, amely a földközeli égitestek becsapódási kockázatát igyekszik számszerűsíteni. A legismertebbek közülük a Torino-skála⁵ (0–10) és a Palermo technikai skála⁶ (folytonos, logaritmusos index), amelyek a becsapódás valószínűségét és a pusztítás mértékét (energiafelszabadulást) egyszerre kívánják megragadni.

A gyakorlati tapasztalat azonban azt mutatja, hogy a valós kockázatot több tényező is befolyásolja, például:

- a becsapódás valószínűsége (P),
- a felszabaduló energia (TNT-egyenértékben),
- a hátralévő idő (mennyi idő van a figyelmeztetésre),
- a becsapódási helyszín (óceán, partközeli vagy szárazföldi zóna, lakott terület),
- a légköri hatások (magaslégköri robbanás, felszíni becsapódás),
- a másodlagos következmények (cunami [szökőár]), kiterjedt tüzek [tűzvész, tűzvihar], globális klímaváltozás),
- az elhárítási nehézség (technológiai és időbeli korlátok).

E többdimenziós kockázati térben egyetlen skála gyakran nem elég részletes vagy rugalmas ahhoz, hogy mindezt tükrözze. Ezért jelen írásunkban újszerű, bővített módszert vezetünk be, amelyet Cosmic Impact Risk Assessment Scale (kozmosz becsapódás kockázatbecslő skála) (CIRAS) néven javasolunk. A CIRAS hét kulcsparaméter (energia, becsapódás valószínűsége, hátralévő idő, helyszín, atmoszferikus hatás, másodlagos kockázatok, elhárítási nehézség) alapján finoman különbözteti meg a különböző ütközési forgatókönyveket, és egy számba is képes sűríteni a teljes kockázatot.

⁵ BINZEL 2000.

⁶ CHESLEY et al. 2002.

Az alábbiakban először ismertetjük a hagyományosan használt Torino-skálát⁷ és Palermo-skálát,⁸ majd az általunk javasolt CIRAS-skálát mutatjuk be részletesen. Ezt követően néhány már lezajlott becsapódást, például a cseljabinszki meteorrobbanást,⁹ a Tunguz-eseményt,¹⁰ és a Barringer-krátert,¹¹ illetve a dinoszauruszok korát lezáró Chicxulub-krátert¹² okozó becsapódást vizsgáljuk a különböző skálák alapján. Végül kitérünk a (99942) Apophis aszteroida¹³ 2029-es földközelségére, bemutatva, hogyan változott a kezdeti becslések szerint akár riasztó veszélyhelyzet a legfrissebb megfigyelési adatok tükrében.

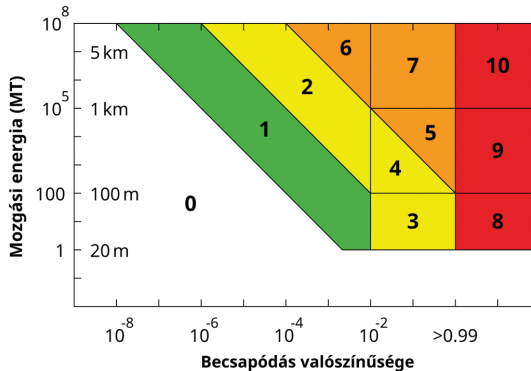
A CIRAS célja, hogy a különböző kockázati tényezőket összehangolva, a szakmai és a laikus közvélemény számára is átláthatóan mutassa be a potenciális ütközésveszélyeket.

Különböző kockázatbecslő skálák

A Torino-skála (Torino Scale)

A Torino-skálát¹⁴ 1999-ben vezették be azzal a céllal, hogy mindenki (a szakemberektől a laikusokig) könnyen megérthesse, milyen mértékű fenyegetést jelent egy-egy újonnan felfedezett égitest és a Föld összeütközésének a lehetősége.¹⁵ A skála 0-tól 10-ig terjedő egész értékekkel osztályozza a kockázatot, egyidejűleg figyelembe véve a becsapódás valószínűségét (P) és a felszabaduló energiát (TNT-egyenértékben, E_{TNT}).

Bár a skálázás végső formája diszkrét (0–10 közötti egész értékek), a háttérben gyakran alkalmaznak folytonos vagy logaritmikus kockázati indexeket, amelyeket aztán lépcsős függvénnyel fordítanak le a Torino-skála egész értékeire. A Torino-skálát mutatja be szemléletesen a 2. ábra.



2. ábra: A Torino-skála

Forrás: BINZEL 2000

⁷ BINZEL 2000.

⁸ CHESLEY et al. 2002.

⁹ BOROVÍČKA 2016; ARTEMIEVA–SHUVALOV 2016.

¹⁰ KERESZTÚRI–TÓTH 2008; MORRISON 2018.

¹¹ KRING 2017; SCHMIEDER–KRING 2020.

¹² POPE et al. 1997.

¹³ Apophis ESA [é. n.]; REDDY 2022.

¹⁴ BINZEL 2000.

¹⁵ Lásd: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>

Példa egy általános kockázati indexre

Az irodalomban gyakorta használt, leegyszerűsített, úgynevezett logaritmikus modell szerint a becsapódási kockázatot egy I index írja le:

$$I = \log_{10} \left(\frac{E_{TNT}}{E_0} \right) + \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right),$$

ahol

E_{TNT} = a robbanás energiája TNT-egyenértékben,

P = a becsapódás valószínűsége,

E_0 és P_0 olyan referenciaértékek, amelyeket a kockázat alapszintjének definiálunk (például $E_0 = 10^9$ kt TNT és $P_0 = 10^{-6}$).

$$TS(I) = \begin{cases} 0, & \text{ha } I < a_1, \\ 1, & \text{ha } a_1 \leq I < a_2, \\ 2, & \text{ha } a_2 \leq I < a_3, \\ \vdots & \\ 10, & \text{ha } I \geq a_{10}, \end{cases}$$

Az így kapott I egy folytonos mutató; azonban a Torino-skála (TS) diszkrét besorolás, ezért a két rendszer közötti átmenetet gyakran lépcsős függvénnyel fejezik ki:

ahol a_1, a_2, \dots, a_{10} az egyes Torino-kategóriák küszöbindexértékei. Ezek megválasztása a történelmi becsapódások gyakoriságán, a fizikai hatások (például légköri robbanás vs. felszíni ütközés) tapasztalatain és a Nemzetközi Csillagászati Unió konszenzusán alapul.

A becsapódás gyakoriságának szerepe

A skála létrehozásakor figyelembe veszik a nagyobb energiájú események ritkaságát is. Gyakorlati becslésekből tudjuk, hogy az E_{TNT} energiával jellemezhető becsapódások átlagos előfordulási gyakorisága (fordított értékük pedig a két esemény közti átlagos időtartam) durván fordított arányosságot követ az energiával vagy a test méretével. Egy leegyszerűsített modellben például:

$$\nu(E_{TNT}) \propto \frac{1}{E_{TNT}^\alpha}$$

ahol $\alpha > 0$ valamilyen illesztett paraméter (empirikusan $\alpha \approx 0,9 \dots 1,1$). Ez azt jelenti, hogy minél nagyobb energiájú az ütközés, annál ritkább a természetben. A Torino besorolásban a rendkívül ritka, de pusztító erejű objektumok magasabb kategóriát is kaphatnak, még viszonylag alacsony P mellett is.

A Torino-skála kategóriái, 0–10-ig:

- 0 – Az adott objektum ütközési energiája elhanyagolható, vagy az ütközés valószínűsége gyakorlatilag nulla.
- 1 – Rendkívül kicsi a becsapódás esélye; nagy valószínűséggel a további megfigyelések kizárják a veszélyt.
- 2–3 – Kis eséllyel bekövetkező esemény, de már nem teljesen elhanyagolható a kockázat.
- 4–7 – Közepes-magas kockázat; fontos az alaposabb megfigyelés, valamint a lehetséges védelmi stratégiák kidolgozása.
- 8–10 – Magas (vagy közel 100%-os) valószínűségű, globális pusztítást okozó becsapódás.

A skála előnye, hogy a fenti egyenletek (illetve az ezekhez kapcsolódó) számításokat egyetlen, könnyen érthető egész számra redukálja.

A Tunguz-esemény (1908) besorolása a Torino-skálán

A múltbeli nagy erejű becsapódások egyik legismertebb példája az 1908-as Tunguz-esemény.¹⁶ Noha a Torino-skála még akkoriban nem létezett, érdemes megvizsgálni, hogyan illeszkedne, milyen kategóriájú lenne ez a történelemtényekbe került esemény.

Becsapódás valószínűsége (P) 1908-ban: a Tunguz-típusú (40–100 méter átmérőjű) objektumok a jelenkori becslések¹⁷ szerint nagyjából 100–200 évente érhetnek el a Föld légkörébe. Ez annyit tesz, hogy egy adott naptári évre vetítve a légkörbe lépés valószínűsége:

$$P \approx \frac{1}{100 \text{ év}} = 0,01$$

Ez csak nagyon durva becslés, és nem is pontosan a Torino-skálán használt valószínűségi értelemben (hiszen 1908-ban már megtörtént).

Felszabaduló energia (E_{TNT}): egyes becslések szerint a Tunguz-esemény 3–10 megatonna TNT-egyenérték közé tehető robbanási energiával¹⁸ járt. Legyen egy köztes érték, például:

$$E_{TNT} \approx 5,0 \cdot 10^6 \text{ kt} .$$

Megfigyelt hatás: a robbanás Szibériában, ritkán lakott területen történt, de körülbelül 2000 km² erdőt döntött ki, és a lökeshullám 100–200 km-es körzetben érzékelhető volt. Ha ez lakott terület felett történik, a pusztítás sokkal nagyobb társadalmi-gazdasági kárral járt volna.

¹⁶ KERESZTÚRI-TÓTH 2008.

¹⁷ Lásd: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>; <https://neo.ssa.esa.int/>

¹⁸ KERESZTÚRI-TÓTH 2008.

Torino-skála szerinti besorolás: egy több megatonnás légköri robbanás jelentős regionális károkat okozhat, és általában a 8–9 sávba sorolnánk, ha előre tudnánk a bekövetkezését (hiszen egy ekkora energia a lakott területek esetében már katasztrofális lehet). Azonban konkrét valószínűségi besorolást csak előzetes pályaszámítás alapján lehetne adni, ami 1908-ban értelemszerűen nem állt rendelkezésre.

A Tunguz-esemény tehát jól mutatja, miért fontos a Torino-skálán figyelembe venni a robbanási energia nagyságrendjét és a becsapódás valószínűségét egyszerre. Ha egy hasonló objektumot előre észlelnénk, és a számítások alapján lenne reális esély a felszíni vagy légköri robbanásra, legalább 7–8-as (vagy akár magasabb) értéket kaphatna, különösen, ha a várható becsapódás lakott környezetet is érintene.

Összegzés

Összességében a Torino-skála a Földet megközelítő (vagy esetleg eltaláló) égitestek legfontosabb jellemzőit, a pálya adatait, az ütközési valószínűséget és az energia-felszabadulást integrálja. Habár a részletekben gyakran logaritmikus indexeket, sztochasztikus szimulációkat és ritkasági korrekciót is alkalmaznak, a végső kimenet egy könnyen kommunikálható, 0–10 közötti szám, amely a laikus közönség számára is világosan jelzi az esetleges ütközés jelentette veszélyt.

A Palermo-skála (Palermo Technical Scale)

A Palermo-skála a földközeli objektumok becsapódásainak kockázatát egy logaritmikus, folytonos mutatóval fejezi ki. Fő célja, hogy összehasonlítsa a vizsgált becsapódási esemény kockázatát egy úgynevezett háttérkockázattal, vagyis azzal a természetes gyakorisággal, amellyel hasonló vagy nagyobb energiájú égitestek átlagosan ütköznek a Földdel. A Palermo-skála szemléltetése a 3. ábrán látható.

A Palermo-skála matematikai háttere

A Palermo-skála (általános formában) az alábbi módon definiálja az esemény kockázati indexét (PS):¹⁹

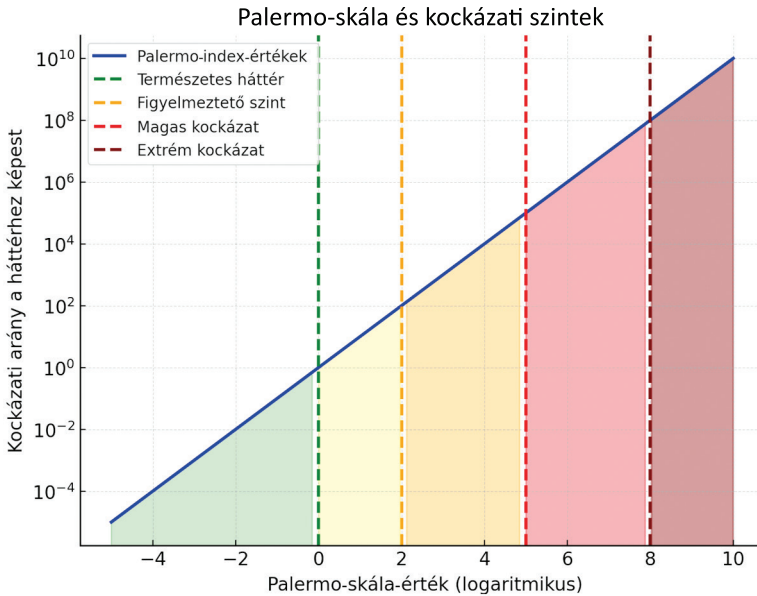
$$PS = \log_{10} \left(\frac{P/\Delta t}{f(B)} \right),$$

ahol P a vizsgált esemény (azaz a konkrét becsapódási lehetőség) valószínűsége, Δt a releváns időintervallum, az adott esemény dátumáig hátralevő idő,

¹⁹ CHESLEY et al. 2002.

$f(B)$ pedig a hasonló vagy nagyobb becsapódási energiájú (vagy pusztító hatású) események évenkénti háttérfrekvenciája a természetes becsapódási statisztikák alapján, B a robbanási/becsapódási energia (TNT-egyenértékben kifejezve).

A PS index logaritmikusan méri, hogy hányszorosára tehető a konkrét esemény kockázata a háttérkockázatnak. A fenti egyenlet egy általános alak, többféle ekvivalens formában is alkalmazzák.



3. ábra: A Palermo-skála

Forrás: a szerzők szerkesztése

A becsapódási energia és a háttérfrekvencia összefüggése

A $f(B)$ háttérfrekvencia, vagyis annak a valószínűsége, hogy egy év alatt legalább egy, B vagy annál nagyobb energiájú becsapódás történik, tipikusan egy csökkenő függvény a nagyobb energiák felé. Létezik egy leegyszerűsített, inverz hatványfüggvény-jellegű modell.²⁰

$$f(B) \approx \lambda_0 \cdot \left(\frac{B}{B_0}\right)^{-\alpha}$$

ahol λ_0 és B_0 megfelelő normálási konstansok, α pedig empirikusan meghatározott kitevő (általában 0,8).

²⁰ CHESLEY et al. 2002.

A nagyobb energiájú becsapódások egyre ritkábbak, mégpedig közel inverz hatványfüggvény szerint (vagy néha enyhén eltérő lognormális eloszlás alapján).

Ha B a becsapódási energia TNT-egyenértékben, tipikusan megajoule vagy kilotonna/megatonna TNT-ben adják meg, majd kiszámítják a rátát, hogy évente átlagosan hányszor fordulhat elő legalább ekkora energiafelszabadulás.

Palermo-index több eseményre

Gyakori, hogy egy adott NEO-nak több különböző Föld-megközelítése is lehet, amelyek mind potenciális ütközési lehetőségeket hordoznak. Ilyenkor a Palermo-indexet az egyes találati valószínűségek, P_i és a hozzájuk tartozó energia, B_i , alapján összegezzük vagy maximalizálva is használják. Például, ha k különböző időpontban (t_1, t_2, \dots, t_k) fennáll a becsapódás lehetősége, az úgynevezett kumulatív Palermo-index²¹ lehet:

$$PS_{kumulatív} = \log_{10} \left(\sum_{i=1}^k \frac{P_i / \Delta t_i}{f(B_i)} \right).$$

Itt: P_i az i -edik potenciális ütközés valószínűsége, Δt_i az adott ütközés esedékességéig hátralévő idő (évben), $f(B)$ a megfelelő háttérfrekvencia a B_i energiájú vagy nagyobb eseményekre, a fenti egyenlet szerint.

Megjegyzendő, hogy a valós gyakorlatban a NASA CNEOS (Center for Near Earth Object Studies) vagy az ESA NEOCC (NEO Coordination Centre) saját, szofisztikáltabb sztochasztikus modelljei és a becsapódási valószínűségi függvények (*impact probability density*) alapján számítják a tényleges Palermo-indexeket. A fenti egyenletek szemléltetik a koncepció lényegét, de a végső alkalmazás részletei némileg eltérőek is lehetnek.

A Palermo-index előjele

A Palermo-skálán a 0 szint azt a helyzetet írja le, amikor a kérdéses esemény kockázata megegyezik a „természetes háttérkockázattal” (azaz az átlagos, hasonló energiájú, véletlenszerűen érkező NEO-kkal).

Ha $PS < 0$, akkor az adott esemény kevésbé kockázatos, mint a „háttér”, vagyis nagyobb valószínűséggel kerülünk szembe más, véletlenszerű, ismeretlen testtel, mint hogy ez az adott objektum ütközzön velünk. Ha $PS > 0$, akkor a vizsgált égitest kockázata nagyobb, mint amit a „háttér” alapján várnánk. Ez már fokozottabb odafigyelést vagy nyomon követést igényel.

Mindezt képlettel is kifejezhetjük. Tegyük fel, hogy az alapegyenletbeli indexből indulunk ki, és a nevezőt háttéreseménynek tekintjük. Ha $PS > 0$, akkor:

²¹ Lásd: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>

$$\frac{P/\Delta t}{f(B)} > 1, \Rightarrow P > f(B)\Delta t,$$

tehát a kérdéses objektum becsapódásának valószínűsége (adott időtartamon belül) magasabb, mint annak az esélye, hogy egy másik, hasonló energiájú égitest ütközzön a Földbe.

A Palermo-skála logaritmikus jellege révén minden tízszeres növekedés a valószínűségben vagy az energiában 1 egységet növel az indexen:

$$PS \rightarrow PS + 1 \text{ ha } P \rightarrow 10P \text{ vagy } E \rightarrow 10E.$$

Hasonlóan, ha a becsapódás valószínűsége a tizedére csökken, a PS értéke 1-gyel csökken. E tulajdonság következtében a skála nagyon jól szemlélteti a kis valószínűségű, de óriási hatású eseményeknél is, hogy mekkora a tényleges kockázat az átlagos, háttérkockázathoz képest.

A Torino- és a Palermo-skála összehasonlítása

Noha a Torino-skála (TS) és a Palermo-skála (PS) hasonló alapgondolaton nyugszik (azaz a becsapódás esélyét és az ütközés energiafelszabadulását veszik főképp figyelembe), a Torino-skála inkább közérthető (0–10 közötti egész érték), míg a Palermo-skála a szakmai igényekre készült, folytonos és finomabb különbségeket is képes megmutatni. A Palermo-skála lehetővé teszi, hogy egy nagyon kicsi, de mégis átlag feletti kockázatot jelentő ütközést (például $PS = +0,2$) elkülönítsünk egy egészen elhanyagolható esetűtől (például $PS = -4,0$).

Általánosságban, ha az objektum Torino-skálán 0 értéket kap, akkor jó eséllyel a Palermo indexe negatív ($PS < 0$). Ha viszont a TS mondjuk 2–3-as tartományban helyezkedik el, akkor elképzelhető, hogy a PS értéke minimálisan ugyan, de már pozitív (például $PS = +0,2$), jelezve, hogy a kockázat kissé meghaladja a háttérszintet.

Összegzés

A Palermo-skála a földközeli objektumok ütközési kockázatát, amelyet a becsapódás valószínűsége és a becsapódás várható energiája határoz meg főképp, egy logaritmikus indexszel méri, figyelembe véve a nagyobb energiájú becsapódások természetes gyakoriságát is.

A Palermo-skála alkalmas arra, hogy finoman rangsorolja a lehetséges földközeli égitestekkel való ütközéseket, és megmutassa, mely objektumok becsapódásának kockázata haladja meg az átlagos háttérkockázatot. Ez különösen fontos olyan eseteknél, ahol a Torino-skála (mivel diszkrét) még nem ad magas értéket, de a szakértőknek már jelezni kell, hogy „ezzel az aszteroidával kicsit többet érdemes foglalkozni”.

Cosmic Impact Risk Assessment Scale (CIRAS), egy többtényezős, kozmikus becsapódás kockázatbecslő skála

A CIRAS-skála tényezőinek bemutatása

A Cosmic Impact Risk Assessment Scale (CIRAS) egy többértékű besorolási rendszer a földközeli objektumok becsapódásának kockázatelemzésére. A korábbi skálák (Torino, Palermo) tapasztalataira építve a CIRAS hét kulcstényezőt vesz figyelembe: (E, P, T, L, A, S, M), amelyek a következők:

- E – becsapódási energia (megatonna TNT, log skála),
- P – becsapódási valószínűség (log skála),
- T – hátralévő idő a becsapódásig (log skála),
- L – becsapódási helyszín (diszkrét kategóriák, például óceán, part, szárazföld),
- A – atmoszferikus hatások (diszkrét kategóriák, például légköri robbanás, felszíni becsapódás),
- S – másodlagos veszélyek (diszkrét kategóriák, például tűz, cunamik, globális klímahatás),
- M – elhárítási nehézség (diszkrét kategóriák, például könnyű eltérítés, nukleáris beavatkozás szükségessége).

Az alábbiakban külön bemutatjuk a hét tényező kiszámításának elvi képleteit, majd egy dimenziócsökkentő (összegző) formulát, amellyel a héttényezős eredmény egy számban is összefoglalható.

Becsapódási energia (E)

A CIRAS a becsapódási energiát logaritmikus (Richter-szerű) skálán kezeli. Ha E_{obj} az égitest (aszteroida, üstökös) teljes becsapódási energiája megatonna TNT-ben (Mt TNT), akkor:

$$E_{CIRAS} = \log_{10}(E_{obj}/1Mt).$$

$$\text{Például } E_{obj} = 5Mt \text{ esetén, } E_{CIRAS} = \log_{10}(5) \approx 0.70.$$

Becsapódási valószínűség (P)

A Palermo skálához hasonlóan a CIRAS is logaritmikus formában értékeli a becsapódás esélyét:

$$P_{CIRAS} = \log_{10}\left(\frac{P_{impact}}{P_{bg}}\right)$$

ahol $P_{impact} \in [0,1]$, a kérdéses objektum ütközési valószínűsége (adott időablakra nézve), míg P_{bg} , az úgynevezett háttér (vagy természetes gyakoriság szerinti) valószínűsége hasonló vagy nagyobb energiájú becsapódásnak ugyanabban az időintervallumban. Ha $P_{CIRAS} > 0$, akkor az esemény kockázata meghaladja a háttértértéket.

Hátralévő idő a becsapódásig (T)

A CIRAS külön tényezőként kezeli, mennyi idő áll rendelkezésre az esetleges ütközés bekövetkeztéig. Legyen Δt_{impact} az években mért hátralévő idő. Ekkor:

$$T_{CIRAS} = \log_{10}(\Delta t_{impact})$$

Ha például $\Delta t_{impact} = 50$ év, akkor, $T_{CIRAS} = \log_{10}(50) \approx 1.70$

Becsapódási helyszín (L)

A CIRAS diszkrét (0–4) skálán kezeli, hogy az égitest szárazföldön vagy óceánban, illetve lakott vagy ritkán lakott területen csapódna be. Például:

$$L = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad (L0: \text{távoli óceán, minimális közvetlen kár}), \\ 1 \quad (L1: \text{nyílt óceán, nagyobb cunami}), \\ 2 \quad (L2: \text{partközeli zóna, súlyosabb cunami}), \\ 3 \quad (L3: \text{ritkán lakott szárazföld, regionális katasztrófa}), \\ 4 \quad (L4: \text{városi/metropolisz térség, katasztrófális pusztítás}). \end{array} \right\}$$

Atmoszferikus hatások (A)

A légköri belépés szöge, a sebesség és az anyagszerkezet meghatározza, hogy a test milyen formában fejt ki a pusztító hatását. A diszkrét, 0–4 közötti érték:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad (A0: \text{teljes légköri elégés, nincs talajbecsapódás}), \\ 1 \quad (A1: \text{részleges szétesés, kisebb lökéshullám}), \\ 2 \quad (A2: \text{magaslégköri robbanás, pl. Tunguz}), \\ 3 \quad (A3: \text{alacsony légköri robbanás, nagy túlnyomás}), \\ 4 \quad (A4: \text{felszíni becsapódás, maximális energiaátadás}). \end{array} \right\}$$

Másodlagos veszélyek (S)

A becsapódás következményeit nemcsak a közvetlen robbanás, hanem a másodlagos hatások is befolyásolják,²² mint például kiterjedt tüzek, szökőárok vagy akár globális klímaváltozás. Különösen ipari területeken egy ilyen esemény másodlagos veszélyeket is jelenthet, például vegyi anyagok szivárgását, robbanásokat vagy tűzterjedést, amelyek ipari biztonsági intézkedéseket²³ igényelnek. A másodlagos (következményes) események közé tartozhat tűzvihar, cunami, globális légköri por és klímaváltozás, vagy akár a biológiai ökoszisztéma összeomlása.

$$S = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad (S0: \text{nincsenek másodlagos hatások}), \\ 1 \quad (S1: \text{lokális tüzek, kisebb környezeti károk}), \\ 2 \quad (S2: \text{cunami, nagyobb szeizmikus vagy regionális hatás}), \\ 3 \quad (S3: \text{globális klímaváltozás, por/aeroszol}), \\ 4 \quad (S4: \text{ökoszisztéma-összeomlás, kihalási esemény}). \end{array} \right\}$$

Elhárítási nehézség (M)

A CIRAS megkülönbözteti, hogy a test eltérítése mennyire reális (kisebb test, hosszabb felkészülési idő) vagy mennyire reménytelen (nincs elég idő, túl nagy vagy gyors test):

$$M = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad (M0: \text{könnyen eltéríthető, kicsi test, sok idő}), \\ 1 \quad (M1: \text{közepes erőfeszítés, becsapódó testtel, ütközéssel eltéríthető}), \\ 2 \quad (M2: \text{nehézkés, nukleáris eszköz is szükséges lehet}), \\ 3 \quad (M3: \text{rendkívül problémás, kevés idő, hatalmas objektum}), \\ 4 \quad (M4: \text{szinte lehetetlen, nincs reális védelem}). \end{array} \right\}$$

Egyetlen, összesített CIRAS-index

A CIRAS a fenti hét kategóriával rendkívül részletes képet nyújt. Sokszor azonban szükség lehet egy „összesített” mutatóra, például döntéshozatalnál, amikor a különböző fenyegetések rangsorolása a cél. Ehhez definiálhatunk egy kompozit CIRAS-értéket, vagy CIRAS-indexet:

$$CIRAS_{index} = w_E E_{CIRAS} + w_P P_{CIRAS} + w_T (-T_{CIRAS}) + w_L L + w_A A + w_S S + w_M M,$$

ahol

²² KERESZTÚRI-SÁRNECZKY 2023.

²³ PALLAGI 2023.

E_{CIRAS} , P_{CIRAS} , T_{CIRAS} logaritmusos értékek, $L, A, S, M \in \{0,1,2,3,4\}$ pedig a diszkrét kategóriák.

CIRAS-index súlyozásának indoklása

A CIRAS-index súlyozásának meghatározása kulcsfontosságú annak érdekében, hogy a földközeli objektumok (NEO-k) által jelentett kockázatokat a megfelelő mértékben tükrözze. A következő megfontolások alapján határoztuk meg a súlyokat:

Becsapódási energia (E_{CIRAS}): a robbanási energia fontos tényező, de önmagában nem elegendő a magas kockázat meghatározásához. Közepes súlyt kap.

Becsapódási valószínűség (P_{CIRAS}): a legfontosabb tényező, hiszen a legnagyobb energiájú események is kevésbé aggasztók, ha az ütközési esély elhanyagolható. Ezért ez kapja a legnagyobb súlyt.

Hátralévő idő (T_{CIRAS}): minél kevesebb idő áll rendelkezésre az ütközés előtt, annál sürgetőbbé válik a helyzet. Ezért negatív előjellel szerepel, és viszonylag nagy súlyt kap.

Becsapódási helyszín (L): a lakott területek érintettsége fontos szempont. Egy városi becsapódás jelentősebb kockázatot jelent, mint egy óceánba történő. Mérsékelt magas súlyt kap.

Atmoszferikus hatások (A): a légköri fragmentáció (szétrobbanás) befolyásolhatja az ütközés hatásait, de önmagában nem döntő tényező. Közepes súlyt kap.

Másodlagos veszélyek (S): ha egy becsapódás globális klímaváltozást vagy szökőárt okozhat, az növeli a kockázatot. Magas súlyt kap, de kisebbet, mint a közvetlen ütközési tényezők.

Elhárítási nehézség (M): ha egy objektum eltérítése gyakorlatilag lehetetlen, az növeli a kockázatot. Közepes súlyt kap.

Ezeket figyelembe véve az alábbi súlyozott egyenletet határoztuk meg:

$$CIRAS_{index} = (0.7)E_{CIRAS} + (1.5)P_{CIRAS} + (-1.2)T_{CIRAS} + (0.8)L \\ + (0.6)A + (1.0)S + (0.7)M$$

A fenti egyenlet súlyozási paraméterei fontosságú sorrendben:

- $w_P = 1.5$ (becsapódási valószínűség): a legnagyobb súlyt kapja, mivel egy esemény kockázata elsősorban annak bekövetkezési valószínűségétől függ.
- $w_T = -1.2$ (hátralévő idő): minél kevesebb idő áll rendelkezésre, annál nagyobb a kockázat, ezért kap viszonylag nagy, de negatív súlyt.
- $w_S = 1.0$ (másodlagos veszélyek): olyan következmények esetén, mint a szökőár vagy globális klímaváltozás, a hatás jelentős lehet.
- $w_L = 0.8$ (becsapódási helyszín): ha egy objektum lakott területre csapódik be, az jelentősen növeli a kockázatot.
- $w_E = 0.7$ (becsapódási energia): közepes súlyt kap, mivel egy nagy energiájú esemény is kevésbé veszélyes, ha nagyon ritka vagy lakatlan területen történik.

- $w_M = 0.7$ (elhárítási nehézség): ha egy égitest eltérítése nagyon nehéz vagy lehetetlen, az növeli a kockázatot, ezért közepes súlyt kap.
- $w_A = 0.6$ (atmoszferikus hatások): közepes fontosságú tényező, mivel a légköri robbanás bizonyos esetekben csökkentheti, de akár növelheti is a károkat.

A fentiek szerint a CIRAS-index megfelelő egyensúlyt tart fenn a különböző tényezők között, és a lehető legrealisabb kockázatértékelést nyújtja.

Példa: a Tunguz-esemény (1908)

Tegyük fel, hogy egy évvel a becsapódás előtt ismertük volna a Tunguz-objektumot (1908. június 30-án történt a robbanás Szibéria fölött):

Becsült energia: $E_{obj} \approx 5Mt$ (a becslések 3–10 Mt közé esnek). Ekkor:

$$E_{CIRAS} = \log_{10}(5) \approx 0.70.$$

Ha a felfedezés után egyértelműen látszott volna, hogy a becsapódás valószínűsége (egy év távlatában) közel 1, akkor tegyük fel $P_{impact} \approx 1$. Ha a háttér-valószínűség ugyanezen idő alatt $P_{bg} = 10^{-6}$ (példa), akkor:

$$P_{CIRAS} = \log_{10}\left(\frac{1}{10^{-6}}\right) = \log_{10}(10^6) = 6$$

A hátralévő idő: $\Delta t_{impact} = 1\text{év}$, ezért, $T_{CIRAS} = \log_{10}(1) = 0$.

(A negatív súly miatt azonban, ha kevesebb idő áll rendelkezésre, például 9 hónap (0,75 év, akkor $\log_{10}0,75 = -0,125$ közel 0,15-dal növelné az index értékét \Rightarrow nagyobb kockázat.)

Helyszín: Szibéria ritkán lakott erdős területe, tehát $L = 3$ („ritkán lakott szárazföld, regionális katasztrófa”).

Atmoszferikus hatás: magaslégköri robbanás, vagyis $A = 2$.

Másodlagos veszélyek: lokális tűz és erdőpusztítás (2000 km²), de nem globális klímaváltozás. Legyen $S = 2$ („regionális” kiterjedés).

Elhárítási nehézség (1908-ban gyakorlatilag semmiféle eltérítési lehetőség sem állt rendelkezésre): $M = 4$ („lehetetlen”).

Ekkor a CIRAS-index:

$$\begin{aligned} CIRAS_{index} &= 0,7 * (0.70) + 1,5 * (6.0) + (-1,2) * (-0) + 0,8 * (3) \\ &+ 0,6 * (2) + 1 * (2) + 0,7 * (4) \approx 18. \end{aligned}$$

Ez a feltételezett szám (hiszen 1908-ban nem volt előzetes megfigyelés) mutatja, hogy ha csak 1 év volna hátra, és a becsapódás biztos, a CIRAS-index rendkívül magas lenne (főleg a P_{CIRAS} és az elháríthatatlanság miatt).

Összegzés

A CIRAS hét tényezője (energia, becsapódási valószínűség, hátralévő idő, helyszín, légköri jellemzők, másodlagos hatások, elhárítási nehézség) sokkal árnyaltabban mutatja be a földközeli objektumok jelentette veszélyt, mint a Torino- vagy Palermo-skála. Ugyanakkor a dimenziócsökkentő definíció formula révén egy számmal is összegezzük a kockázat, ha gyorsan kell rangsorolni különböző aszteroidák között.

A Tunguz-esemény (1908) példája megmutatja, hogyan lehetne a CIRAS kerekein belül előzetesen felmérni egy regionális, légköri robbanás kockázatát, és miért lenne kiugróan magas az összesített kockázati index, ha a becsapódás gyakorlatilag elkerülhetetlen és időben közel lenne.

A CIRAS tehát a planetáris védelem új útja:

többtényezős elemzés + egydimenziós kockázati index = jobb döntéshozatal és kommunikáció.

Korábbi földi becsapódások és kockázatuk több skála alapján

A Föld történetében számos kisebb-nagyobb becsapódás történt. Híres, már lezajlott eseményeket vetünk össze a Torino-, Palermo- és CIRAS-skálán, fiktív (utólagos) előrejelzésként, mintha a becsapódás előtt ismertek lettek volna a skálák, és pontos pályadataink lettek volna a becsapódó testekről.

Tunguz-esemény (1908)

Adatok (hipotetikus): $E_{obj} \approx 5Mt$, $P_{impact} \approx 1$, $\Delta t \approx 1\text{év}$.

Torino-skála: 8–9. (Egy ilyen biztos és jelentős energiefel szabadulással járó légköri robbanás regionális-kontinentális pusztítást okozhatott volna.)

Palermo-skála: $PS \approx +5,00$

CIRAS-skála: $(E, P, T, L, A, S, M) = (8; 9; 1; 4; 4; 4; 4)$

$CIRAS_{index} \approx 18$.

Cseljabinszki esemény (2013)

Adatok (hipotetikus): $E_{obj} \approx 0,5Mt$, $P_{impact} \approx 1$, $\Delta t \approx 0.0027\text{év} \approx 1\text{nap}$

Torino-skála: 4–5.

Palermo-skála: $PS \approx +7,27$

CIRAS-index: $(E, P, T, L, A, S, M) = (-0,3; 6,7; -2,6; 3; 2; 1; 4)$

$CIRAS_{index} \approx 20$

K-T-határ (körülbelül 66 millió évvel ezelőtt)

Adatok (hipotetikus): $E_{obj} \approx 10^8 Mt$, $P_{impact} = 1$, $\Delta t \approx 10\text{év}$

Torino-skála: 10.

Palermo-skála: $PS \gtrsim +9,00$

CIRAS-index: $(E, P, T, L, A, S, M) = (8; 9; 1; 4; 4; 4; 4)$

$CIRAS_{index} \approx 30$

Barringer-kráter okozó becsapódás (Arizona, körülbelül 50 ezer éve)

Adatok (hipotetikus): $E_{obj} \approx 10Mt$, $P_{impact} \approx 1$, $\Delta t \approx 1\text{év}$

Torino-skála: 8–9.

Palermo-skála: $PS \approx +5,00$

CIRAS-index: $(E, P, T, L, A, S, M) = (1; 5; 0; 3; 4; 1; 4)$

$CIRAS_{index} \approx 17$

Ch'ing-yang esemény (1490, Kína)²⁴

Adatok (hipotetikus): $E_{obj} \approx 2Mt$, $P_{impact} \approx 1$, $\Delta t \approx 1\text{év}$

Torino skála: 8–9.

Palermo skála: $PS \approx +4,52$

CIRAS-index:

$CIRAS_{index} \approx 15$

Korábbi földi becsapódások kockázatbecslő indexének összehasonlítása több skála alapján

Az 1. táblázatban áttekinthetjük, összehasonlíthatjuk az öt esemény Torino-skála, Palermo-skála és CIRAS-index szerinti értékeit.

1. táblázat: Korábbi földi becsapódások kockázatbecslő indexeinek összehasonlítása

Esemény	Torino-skála index (TS)	Palermo-skála index (PS)	CIRAS-index
Tunguz (1908)	8–9	+5,00	18
Cseljabinszk (2013)	4–5	+7,27	20
K-T-határ (Chicxulub, 66 millió éve)	10	+9,00	30
Barringer-kráter (50 ezer éve)	8–9	+5,00	17
Ch'ing-yang (1490)	8–9	+4,52	15

Forrás: a szerzők szerkesztése

²⁴ YAU–WEISSMAN–YEOMANS 1994.

Összegzés

A fenti példák jól mutatják, hogy a Torino-skála (TS), a Palermo-skála (PS) és a CIRAS-skála egyaránt alkalmas a becsapódási veszély kifejezésére, bár más-más fókuszponttal és részletességgel.

A Torino-skála egyszerű, 0–10-es számot ad a széles nagyközönség számára.

A Palermo-skála (PS) mint folytonos logaritmikus index összeveti a kockázatot a természetes háttérgyakorisággal.

A CIRAS-skála egy komplexebb, többdimenziós értékelési rendszer, amely hét különböző faktort figyelembe véve ad végső besorolást.

Az új megfigyelések alapján esetlegesen megváltoztatott súlyok alkalmazásával a CIRAS-index még árnyaltabb képet adhat a kockázatok rangsorolására. Az eredmények egyértelműen mutatják, hogy a Tunguz-, Barringer-kráter-, illetve Chicxulub-be-csapódás rendkívül magas besorolást kapott volna minden rendszerben.

Az Apophis aszteroida

Az első kockázatbecslések (2004-ben)

A (99942) Apophis aszteroidát 2004-ben fedezték fel és körülbelül 340 méter átmérőjűnek, több tízmillió tonnás égitestnek becsülték. A kezdeti megfigyelések bizonytalan pályaadatokat szolgáltatottak, és a Földdel való ütközés esélyét akkor még néhány század százalékra tették. Bár ez elsőre igen csekélynek tűnhet, a Naprendszerben tapasztalható perturbációk és hosszú időskálák miatt a kezdeti Torino-skála besorolás átmenetileg elérte a 4-es szintet, ami már komolyabb figyelmet indokolt.

A Palermo-index (PS): $PS = \log_{10} \left(\frac{P_{\text{impact}}/\Delta t}{f(E_{TNT})} \right)$

ahol P_{impact} az ütközés becsült valószínűsége

Δt az időtáv (például a következő néhány évtized),

$f(E_{TNT})$ a hasonló, vagy nagyobb energiájú becsapódások éves gyakorisága.

A korai számításokban P_{impact} (évtizedes léptékben) volt ugyan kicsi, ám mégis jelentős a háttérhez képest, így a Palermo-index rövid ideig pozitív értékre ugrott, jelezve, hogy a kockázat a természetes háttérnél magasabb.

A CIRAS modellje szerint az Apophis esetében a valószínűség (P) komponens volt a kezdeti időkben magasabb, míg a hátralévő idő (T) és az elhárítási nehézség (M) is közepesen magas értéket kaphatott volna. A pontosított pályaadatok azonban hamar csökkentették mind a valószínűséget, mind a CIRAS-indexet.

Az Apophis 2029. április 13-án, várhatóan mindössze 31 000 km távolságban halad el a Föld felszíne felett. Összehasonlítva a geostacionárius műholdakkal, amelyek körülbelül 36 000 km magasságban keringenek, ez még azoknál is alacsonyabb pályát jelent.

Skálaindexek biztos becsapódás esetén

Az Apophis becsült tömege több tízmillió tonna, ezért egy felszíni becsapódás esetén a felszabaduló energia (mintegy 5×10^4 Mt TNT) regionális vagy kontinentális szintű pusztítást okozhatna.

Torino-skála esetén egy biztos becsapódásnál a 8–10 tartományba került volna, attól függően, mennyire lakott területet érintene. A Palermo-index +5 fölé emelkedne, ha a becsapódás esélye 1–2 éven belül reális lenne.

CIRAS szempontjából az energia (E) 4,70, a becsapódási valószínűség (P) jelenleg alacsony, de ha viszonylag nagy esélye lenne a becsapódásnak, a CIRAS-index 15 vagy annál nagyobb érték is lehetne (nagyban függene a becsapódás helyétől, a másodlagos veszélyektől).

Aktuális besorolás mindhárom skálán

A (99942) Apophis jelenlegi adatai alapján a 2029-es földközelség során a becsapódási valószínűség gyakorlatilag nulla. Bár az aszteroida becsapódási energiája óriási lenne, a kockázati besorolás minden skálán alacsony:

A Torino-skála értéke: $TS=0$

A Palermo index számítása:

$$PS = \log_{10} \left(\frac{P_{\text{impact}}/\Delta t}{f(E_{TNT})} \right)$$

Ha $P_{\text{impact}} \approx 10^{-8}$ a következő 30 évre, és $f(E_{TNT}) \approx 10^{-8}$ /év, akkor:

$$PS = \log_{10}(0.0333) \approx -1.48.$$

CIRAS-index

$$(E, P, T, L, A, S, M) = (4, 7; 0; 4; 0; 0; 0; 2)$$

Végső CIRAS-index:

$$CIRAS_{\text{index}} = 0,7 * 4,70 + 0 + 1,2 * \lg 4 + 0 + 0 + 0 + 0,7 * 2 = 5,41$$

Konklúzió: a Torino-skála, a Palermo-skála és a CIRAS-rendszer egyaránt alacsony kockázatot mutat az Apophis aszteroidára.

Megjegyzés: ha a jövőben az Apophis pályája változna, a besorolások is módosulhatnak, ezért a folyamatos megfigyelés fontos.

Összefoglalás

A földközeli objektumokkal kapcsolatos kutatások és a bolygóvédelmi stratégiák kidolgozása ma már kulcsfontosságú asztronómiai és technológiai kihívás. A Torino-skála 0–10 közötti, közérthető besorolást ad, míg a Palermo-skála folytonos logaritmikus indexével összehasonlítható a kockázat és a természetes háttérbecsapódások gyakorisága. Az újabb CIRAS-rendszer pedig többtényezős megközelítéssel képes számserűsíteni a veszélyt, és szükség esetén akár egyetlen indexbe sűríteni.

A (99942) Apophis kezdeti besorolása rávilágított, hogy a pályaadatok bizonytalansága milyen nagy hatással lehet egy égitestről alkotott kockázat megítélésekor. Bár az Apophis esetében az ütközés jelenlegi becslése 2029-ben gyakorlatilag nulla, jövőbeli perturbációk és földközeli átvonulások miatt továbbra is kiemelt megfigyelési célpont marad. A 2029-es rendkívüli közelség egyfelől kivételes tudományos lehetőséget biztosít (például radaros felszintérképezés, gravitációs mérések), másfelől ráirányítja a figyelmet a planetáris védelem szükségességére és a pályapontosítás fontosságára.

Az Apophis esete jól példázza, hogyan változhat a Torino-, Palermo- és CIRAS-skála szerinti értékelés a megfigyelések szaporodásával és a pályabecslések pontosításával.

Felhasznált irodalom

- Apophis ESA [é. n.]. *The European Space Agency*. Online: www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis
- ARTEMIEVA, Natalia – SHUVALOV, Valery (2016): From Tunguska to Chelyabinsk via Jupiter. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 37–56. Online: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012218>
- BINZEL, Richard P. (2000): The Torino Impact Hazard Scale. *Planetary and Space Science*, 48(4), 297–303. Online: [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(00\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(00)00006-4)
- BOROVÍČKA, Jiří (2016): The Chelyabinsk Event. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 11(A29A), 247–252. Online: <https://doi.org/10.1017/S1743921316002982>
- CHESLEY, Steven. R. et al. (2002): Quantifying the Risk Posed by Potential Earth Impacts. *Icarus*, 159(2), 423–432. Online: <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6910>
- ÉRCES Gergő – VASS Gyula (2018): Veszélyes ipari üzemek tűzvédelme – ipari üzemek fenntartható tűzbiztonságának fejlesztési lehetőségei a komplex tűzvédelem tekintetében. *Műszaki Katonai Közlöny*, 28(4), 2–22. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2018_4_01_Erces%20G%20-%20Vass%20Gy_MKK_cikk.pdf
- KERESZTÚRI Ákos – SÁRNECZKY Krisztián (2023): *Célpont a Föld? Kisbolygók a láthatáron*. Budapest: Magyar Csillagászati Egyesület.
- KERESZTÚRI Ákos – TÓTH Imre (2008): Kisbolygó vagy üstökös? A Tunguz-esemény. *Meteor*, 38(6), 3–9. Online: https://epa.oszk.hu/03000/03054/00358/pdf/EPA03054_meteor_2008_06.pdf
- KRING, David A. (2017): *Guidebook to the Geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona (a.k.a. Meteor Crater)*. [H. n.]: Lunar and Planetary Institute.

- MORRISON, David (2018): Tunguska Workshop: Applying Modern Tools to Understand the 1908 Tunguska Impact. *NASA/Technical Memorandum* (NASA/TM—220174). Online: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002302/downloads/20190002302.pdf>
- PALLAGI András (2023): *Kritikus infrastruktúrák védelmének vizsgálata*. PhD-disszertáció. Budapest: Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola. Online: <https://bdi.uni-obuda.hu/wp-content/uploads/2024/06/Doktori-PhD-ertekezes-Pallagi-Andras.pdf>
- POPE, Kevin O. et al. (1997): Energy, Volatile Production, and Climatic Effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary Impact. *Journal of Geophysical Research*, 102(E9), 21645–21664. Online: <https://doi.org/10.1029/97JE01743>
- REDDY, Vishnu et al. (2022): Apophis Planetary Defense Campaign. *The Planetary Science Journal*, 3(5), 1–16. Online: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac66eb>
- SCHMIEDER, Martin – KRING, David A. (2020): Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, 20(1), 91–141. Online: <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2085>
- YAU, Kevin – WEISSMAN, Paul – YEOMANS, Donald (1994): Meteorite Falls in China and Some Related Human Casualty Events. *Meteoritics*, 29(6), 864–871. Online: <https://adsabs.harvard.edu/full/1994Metic..29..864Y>