

VARGA PÉTER

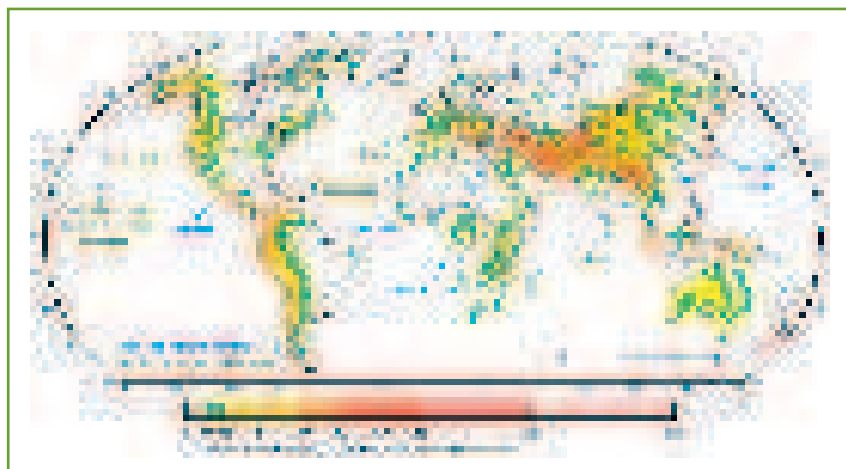
Törekvések a földrengéskárok enyhítésére

Szeizmológiai riasztórendszerek

A földrengések várható hatásának, pusztításának meghatározását a valószínűségi és determinisztikus alapon végzett veszélyeztetettségi eljárások teszik lehetővé. Ezek ma már meglehetősen biztos tervezési alapot adnak a mérnökök kezébe. És a veszélyeztetettség meghatározása fontosabb, mint a jövőben egy adott helyen várható földrengés időpontjának és méretének (magnitúdójának) prognózisa. A szeizmológia egy másik napjainkban gyorsan fejlődő ága, mely szintén jelentős mértékben hozzájárul szeizmológiai értelemben vett biztonsághoz a földrengési riasztó rendszerek fejlesztése.

A rengéshullámok beérkezését megelőzően működésbe lépő *szeizmológiai riasztórendszerek* fejlesztése elsősorban a szeizmológiai szempontból legaktívabb területeken fontos. Ez a szeizmológiai biztonságot növelő eljárás szemben a valószínűségi és a determinisztikus veszélyeztetettség meghatározással nem a múltbeli, hanem a már bekövetkezett földrengésekkel kapcsolatos. A riasztás a romboló hatást képező hullámok beérkezése előtt néhányszor tíz másodperccel, esetleg egy-két perccel áll rendelkezésre és lehetővé tesz egy sor óvintézkedést melyek célja az emberi életek és a mérnöki létesítmények védelme. Így például tömegtájékoztatási eszközökkel tájékoztatni lehet a lakosságot, és ha az a riasztás esetén szükséges teendőire előzőleg tájékoztatva volt az áldozatok száma radikálisan csökkenthető. A riasztás megléte és a földrengéshullámok beérkezése között rendelkezésre álló rövid idő számos műszaki intézkedés megtételét is lehetővé teszi.

A földrengéskárok enyhítésére irányuló törekvések talán a legújabb és számos esetben és számos országban már többé-kevésbé rutinszerűen alkalmazott eszközei a szeizmológiai műszerek felhasználására épülő riasztórendszerek (1. ábra). A fejlesztéseket jelentős részben indokolja, hogy a múltban számos nagyvárost sújtott földrengés katasztrófa és az ilyenekre a jövőben is számítani kell tekintettel azok szeizmotektonikai helyzetére. A földrengéskárok jelentős része kötő-



1. ábra. A földrengési riasztórendszerek 2010 (Allen, R. M. alapján)

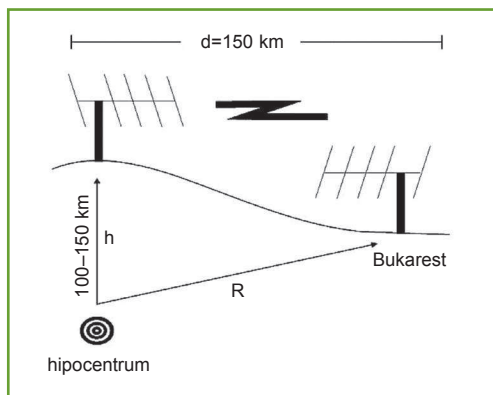
dik földrengések következtében bekövetkező tűzvészekhez (Lisszabon, 1755, $M=8,5-9,0$; San Francisco, 1906, $M=7,9$; Tokió (Great Kanto Earthquake, 1923, $M=7,9$; Kobe, 1995, $M=6,8$), az energiaellátó rendszer összeomlásához (Tajvan, 2010, $M=6,4$, Tohoku 2011, $M=9,0$) és ipari létesítmények leállításához (Izmit, 1999, $M=7,6$; Tajvan, 1999, $M=7,6$). Az ilyen típusú károk csökkenthetőek egy olyan rendszer működtetése által, mely közvetlenül a földrengés kattanásakor riasztó jelzést továbbít a veszélyeztetett településeknek, ipari létesítményeknek, még azt megelőzően, hogy azokat a földrengés hullámok elérnék. Így lehetőség nyílik

- az elektromos rendszerek működésébe történő beavatkozásra (lekapcsolás, átírányítás)
- víz- és gázvezetékek lezárására
- nagysebességű vonatok, metrószerelvények fékezésére, leállítására
- repülőgépek le- és felszállásának felfüggesztésére
- vészpartalék generátorok tüzembe helyezésére
- erőművek, veszélyes ipari létesítmények működésének megfelelő módosítására, leállítására

- kórházak, kórházi műtők riasztására
- liftek leállítására
- veszélyes helyeken dolgozó emberek biztonságba helyezésére
- a lakosság hangjelzés, tömegtájékoztatás révén történő tájékoztatására

A földrengésekkel kapcsolatos riasztás (earthquake early warning - EEW) természetesen nem földrengés előrejelzés: a cél nem prognosztizálni, hanem figyelmeztetni.

A földrengés-észlelő állomások, illetve azok hálózatai által szolgáltatott jeleket (szeizmogramokat, accelerogramokat) nemcsak földrengések esetében, hanem más természeti katasztrófatípussal kapcsolatban is használják riasztáshoz. A földrengések által keltett cunamik hatására többször tíz perccel vagy akár több órával előbb lehet riasztást kiadni regionális szeizmológiai hálózat segítségével (ilyen céllal fejlesztették ki például a Hawaiiin működő EEW rendszert). Alvó vulkánok ébredésekor közismert, hogy a hegyen és közvetlen környezetében megnő a szeizmikus aktivitás. A tevékenység során, a gáznymás növekedés következtében a rengések jellege változik, megnő a hosszú periódusú hullámok aránya. Ez a jelenség a kitörést megelő-



2. ábra. Példa a földrengészónán kívüli riasztásra. Német, amerikai és román szeizmológusok 1999-ben a Seismological Research Letters című folyóiratban megjelent cikke alapján

ző időszakot jellemzi és erre alapozva már több esetben sikerült kitérőket több órával előre jelezni (Mount Redoubt, Alaszka, 1993; Popocatepetl, Mexikó, 2000). A várható földrengések hatására történő figyelmeztetésre áll a legkevesebb idő rendelkezésre (ez általában kevesebb, mint egy perc).

A földrengések veszélyt hordozó hullámainak beérkezését megelőző riasztás két típusát különböztethetjük meg. Az első a földrengés forrászónában kipattan rengés miatti riasztás a zónán kívüli területeken. Ennek alapja az, hogy a forrás zónában lévő állomások adataiból készült riasztás előbb érhet elektronikus formában a veszélyeztetett területekre, mint a pusztító földrengés hullámok. A másik módszer: egy adott objektum közvetlen védelme a földrengés hatásától. Ennek a lehetőségnek alapja az, hogy a gyorsabb primer (longitudinális) hullámok már tartalmazzák a földrengésre vonatkozó összes fontos szeizmológiai információt, amplitúdókat, spektrumokat, míg a lassabb szekunder (transzverzális) hullámok pedig az energiát. A primer és a szekunder hullámok sebességei:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

ahol μ és λ a közetek rugalmas paraméterei, ρ pedig sűrűsége. Tekintettel arra, hogy a közetek többségében $\mu \approx \lambda$

$$V_p \approx V_s \times \sqrt{3}$$

Például: a V_p és V_s hullámok tipikus sebességkülönbsége gránitok esetében $5\text{km/s} - 3\text{km/s} = 2\text{km/s}$ az energia döntő részét hordozó szekunder hullám késése 10 km távolságra a rengés fészekétől 5 másodperc.

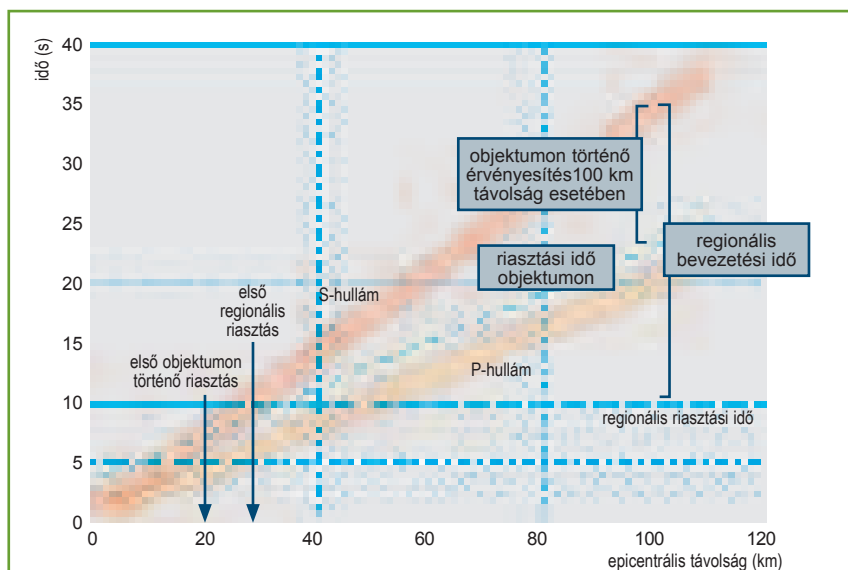
Mindkét esetben a földrengés várható hatására figyelmeztető rendszerek (earthquake early warning systems –EWS) négy fő egységből állnak:

1. észlelő eszközök hálózata
2. valós idejű adatátvitel az érzékelő műszerektől (szeizmométerektől, gyorsulásmérőktől) a számítóközpontig
3. számítóközpont, mely a beérkező szeizmogramokból, accelerogramokból riasztó jelet (jeleket) generál
4. automatikus kommunikációs rendszer, mely a riasztást a megfelelő formában eljuttatja a szükséges helyekre.

A földrengés hatás beérkezését megelőző riasztás ötlete elég régi. Az 1868. október 21-i San Francisco-i ($M \sim 7$) földrengést követően egy J.D. Cooper nevű orvos vetette fel és publikálta a San Francisco Evening Bulletin című újságban. Érzékelők telepítését javasolta a várostól 16 km-től 160 km-ig terjedő távolságokban. Ezeket távírókábelekkel kötötte volna össze a vá-

$$t_{SP} = \frac{1}{V_s} \sqrt{h^2 + d^2} - \frac{h}{V_p}$$

Ha a hullámsebességek $V_p = 8.0\text{km/s}$ és $V_s = 4.6\text{km/s}$ valamint az epicentrális távolság $d = 130\text{km}$ a riasztáshoz rendelkezésre álló idő 23.35 másodperc, ha a hipocentrum mélysége $h = 150\text{km}$ és 26.85 másodperc, ha $h = 200\text{km}$. A helyzet a gyakorlatban ennél valamivel bonyolultabb. Tekintettel arra, hogy az objektumon történő riasztás elkészültéhez mintegy 10 másodperc szükséges (3. ábra), $\sim 20\text{km}$ -nél kisebb távolságban megelőző riasztás elvileg sem készülhet. Éppen ezért az objektumon történő riasztásra kapott t_{SP} értéket a regionális bevezetési idő értékével (~ 10 másodperc) csökkenteni kell. Az automatikus riasztás első lépése a földrengés-detektálás és -lokalizálás. Ez tulajdonképpen standard szeizmológiai feladat. A második lépés koncepcionálisan nehéz feladat, mert a gyorsasági



3. ábra. A földrengés forrászónán kívüli riasztáshoz szükséges idő az epicentrális távolság függvényében

ros közepében lévő haranggal. Ez valamivel a földrengés hullámok beérkezését megelőzően hangjelet tudott volna szolgáltatni.

A regionális földrengészónán kívüli területen történő riasztásra példaként az Európa egyik legveszélyesebb szeizmikus forrásterülete a Kárpát-kanyar külső ívén elhelyezkedő Vrancea megyében (Románia) található rendszert mutatom be. Az itt kipattanó földrengések nagy és viszonylag gyakori veszélyt jelentenek Bukarest számára. Ennek a veszélynek csökkentése érdekében román, német és amerikai szakemberek a 2. ábrán vázlatosan szemléltetett rendszert fejlesztették ki. Abból indultak ki, hogy a hipocentrumból a földrengéshullámok előbb érik el a helyi szeizmométeres állomást, mint a román fővárost. Az S hullám késése a P hullámhoz

igény miatt a magnitúdó becslése a szeizmogram első néhány másodperces szakasza alapján készül, és ezért közelítő eljárások alkalmazása válik szükségessé. Így, elsősorban a nagy ($M \geq 6$) földrengések esetében, a meghatározás pontossága csökken. A harmadik lépésben a talaj maximális vízszintes elmozdulását, sebességét és gyorsulását kell számítani a célobjektumon. Az említett paraméterek elvileg pontosan meghatározhatóak, de az eredmény döntő mértékben függ a föld- vagyis hullámcsillapodás értékének pontos ismeretétől. Ezután kerülhet sor a riasztás küldésére, melynek tartalma függ a földrengés forrásparaméterek meghatározásának pontosságától és a cél objektumon becsült talajmozgás csúcserőtekeitől. Elkészítésekor figyelembe veendő a védendő objektum(ok) memők-szeizmológiai tulajdonságai.

A földrengésriasztás másik lehetősége, mint már említettem, egy adott objektum közvetlen védelmével kapcsolatos. Szakirodalmi elnevezése „valós idejű szeizmológia (real time seismology)”. Alapjául az a τ_0 minimális időtartam szolgál, mely a primer P hullám első beérkezésétől a forrás természetének meghatározásához szükséges. Némi egyszerűsítéssel

$$\tau_0 = \frac{1}{\sqrt{\langle f^2 \rangle}}$$

ahol

$$\langle f^2 \rangle$$

az átlagos földrengéshullám frekvencia négyzete a talajelmozdulás spektrumával súlyozva.

A 4. ábra modellszámítás alapján mutatja, hogyan kapcsolódik τ_0 a magnitúdó értékéhez. A szeizmométer által rögzített szeizmogram alapján az automatikus feldolgozást végző rendszer először azt vizsgálja milyen nagy a primer P hullám amplitúdója. Amennyiben ez kicsi, akkor kis távoli rengésről van szó, nincs további teendő. Ha P nagy, akkor kerül sor τ_0 értékének vizsgálatára. Amennyiben ez az érték kicsi, kis, közeli eseménnyel van dolgunk, de ha τ_0 nagy, közeli jelentős földrengéssel van dolgunk és a rendszer riasztást küld.

Az ilyen és hasonló rendszerek nagy számban működnek az 1960-as évek óta Japánban. Jelenleg 1000 állomásból áll az országos hálózat, mely messze a legnagyobb a világon (összehasonlításképpen: a területileg valamivel nagyobb Kaliforniában 2008-ban 300 állomás volt üzemben). A fejlődésnek lendületet adott a Kobéban 1995-ben ($M=6,9$) kipattant földrengés. Az erre a célra kifejlesztett UR-EDAS nevű rendszer segítségével már számos esetben sikerült a nagysebességű Sinkanszen vonatokat közeli földrengés esetén lelassítani, leállítani. Ugyancsak Japánban országosan kiépült a lakosságot és a létesítményeket riasztó rendszer. Szükség esetén a lakosság mobiltelefonjaira kerül a földrengés riasztó rendszer figyelmeztető jelzése. A japán riasztó rendszer hatására a 2011. március 11-i tohokui földrengés idején sikerült a térség atomerőműveinek működését a kialakult helyzetnek megfelelően módosítani.

Az 1960–1970-es években az Egyesült Államok Földtani Szolgálat (USGS) a földrengések gyors lokalizálását lehetővé tevő telemetriai állomáshálózatot fejlesztett ki Kalifornia leginkább veszélyeztetett középső részén. A kilencvenes években Kaliforniában további három hálózatot hoztak létre: CUBE (1991), REDI (1996) és TriNet (1998). Ezek integrálásával jött létre 2000 után a Shake Map regionális rendszer, melynek teljes kiépítés még mindig folyamatban van. Hawaiiin a csendes-óceáni cunami riasztási rendszer

tevékenységének alátámasztása céljából folyik fejlesztés.

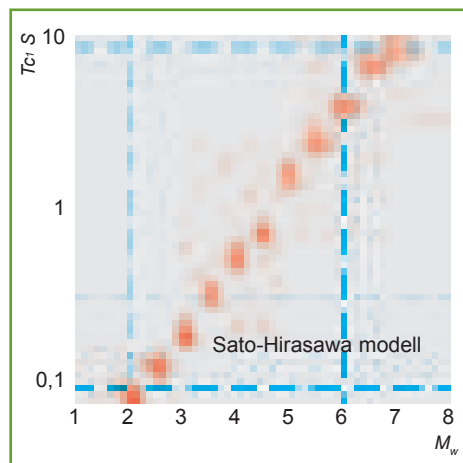
Mexikóváros védelmére a fővárostól 300 km távolságban lévő szeizmikusan aktív Guerrero területére 1991-ben telepítették a SAS nevű rendszert (Seismic Alert System), melyet eredményesen kipróbáltak. 2003 óta a mexikói rendszer további városokra (Toulca, Acapulco és Chilpancingo) is kiterjed. A SASO rendszert Oaxaca város védelmére hozták létre 2003-ban. A két rendszer működését 12, illetve 35 szeizmológia állomás teszi lehetővé. A rendszer segítségével a lakosság rádió útján értesíthető a közeli veszélyre.

Európában kifejlesztés alatt áll Olaszország és Svájc riasztási rendszere és aktív a román és a török is. Ez utóbbi a Márvány-tenger térségében kiépített állomáshálózaton alapul és feladata a különösen veszélyeztetett Isztanbul védelme. Tíz gyorsulásmérőből áll. Amennyiben egy állomáson egy meghatározott rövid időintervallumon belül a szeizmikus gyorsulás értéke egy előre meghatározott szintet meghalad, az állomás jelet küld a központnak. Ha egyidejűleg más állomáson is hasonló jel képződik a rendszer riasztást ad ki.

Az Európai Unió a 6. keretprogram segítségével 2006 és 2009 között a multinacionális SAFER (Seismic Early Warning For Europe) projekt keretében fogott először EEW-rendszert fejlesztésébe. A cél ott európai és mediterrán nagyváros (Athén, Bukarest, Kairó, Isztanbul és Nápoly) mintegy negyvenmillió lakosának védelme volt.

Ázsiában Japán után Tajvan fejlesztett ki a sziget középső részén egy 86 gyorsulásmérőből álló rendszert. Ez riasztást biztosít a feltételezett rengés központjától 70 km-nél távolabb levő települések számára. A rendszer az 1990-es évek vége óta üzemszerűen működik. A hálózat közepén egy 21 km sugarú körön belül a rendszer nem ad ki riasztást. Ilyen néma zónák természetesen más földrengés riasztó rendszerek esetében is kell, hogy legyenek. A zóna nagysága a földrengéshelyektől az állomásig meglévő távolságtól és a szeizmogram első – a jelfeldolgozáshoz szükséges – szakaszának beérkezéséhez szükséges időtől (általában 3 másodperc) függ. Ezért a forrástól általában 20–25 km távolságon belüli területek nem riaszthatók.

Kína jelenleg fejlesztés alatt álló rendszerének tesztelése 2010 februárjában kezdődött. Nincs megbízható információ arról, hogy ez a rendszer az eltelt több mint két év alatt áttért volna a rutinszerű működésre. Feladata Peking és környékének riasztása. A fejlesztésben tajvani szakemberek is részt vállaltak. A hálózat 94 szélessávú és 68 rövidperiódusú szeizmométerből áll. A pekingi központ akkor ad ki riasztást, ha legalább három állomás küld egyidejűleg eseményjelentést. Az állomások itt is a P hullám első 3 másodpercig tartó szakaszát használják fel adatfeldolgozáshoz. 2010. feb-



4. ábra. τ_0 minimális időtartam és a magnitúdó közötti kapcsolat Saito és Hirasawa modellszámítása alapján

ruár elseje után 139 eseményről készült riasztó közlemény, ezek közül a legkisebb $M=3$ volt.

A földrengésekkel kapcsolatos riasztó rendszerekkel elmondottakat összegezve megállapítható, hogy ezek az 1990-es évek óta már több országban rutinszerűen működnek (sőt Japánban az 1960-as évektől). Napjainkban a rendszerek hatékonysága gyorsan javul a szeizmométer-érzékenység és megbízhatóság növekedése, és a számítástechnikai eszközök tökéletesedése miatt. Ugyanakkor megállapítható az is, hogy az automatizált földrengésriasztás kiépítése és üzemben tartása ma még meglehetősen költséges. Alkalmazása csak földrengések által fokozottan veszélyeztetett térségekben indokolt.

A jelenlegi rendszerek korlátai:

- Az epicentrumtól számított 20–25 km távolságon belül a rendszerek nem működnek.
- A nagy ($M \geq 7,5$) rengések esetében a földrengések magnitúdójának meghatározásából adódó értékek nem megbízhatóak, annak ellenére, hogy a Szumátrai földrengést követően (2004. december 26., $M=9,1$) több közelítő módszert is kifejlesztettek a magnitúdó értékek gyors meghatározása érdekében.
- A jelenlegi rendszerek nem veszik figyelembe, hogy a célterület földtani szerkezetétől jelentős mértékben függ a beérkező földrengés miatti kár mértéke.
- A jelenleg meglévő rendszerek (tudomásom szerint), kivéve a japánt és a kínait, még nem teszik lehetővé a lakosság közvetlen elérését biztosító tájékoztatósi eszközök (e-mail, SMS). A mexikói rendszer rádióon keresztül ad riasztást.

A földrengésekkel kapcsolatos riasztórendszerek napjainkban gyorsan fejlődnek és feltétlenül nagyon ígéretes eszközt jelentenek az emberi életek megóvása és a károk csökkentése terén.