

Fekete Árpád¹

A földrengéskockázat elemzése valószínűségi módszerrel

The Analysis of Seismic Hazard with the Probabilistic Method

A földrengéskockázat mérnöki szempontból való elemzésének célja, hogy a tervezett építmények ellen tudjanak állni adott mértékű talajmozgásnak. Egy jövőben bekövetkező földrengésnek nagy a bizonytalansága a helyet, a méretet és az ebből eredő talajmozgás-intenzitást illetően. A valószínűségi földrengéskockázat-analízis (Probabilistic Seismic Hazard Analysis – a továbbiakban: PSHA) megpróbálja ezeket a bizonytalanságokat számszerűsíteni és kombinálni, hogy egy adott hely jövőbeli rengésveszélyeztetettsége explicit módon leírható legyen. A cikk konkrét számítási példán is demonstrálja a módszer alkalmazását. Magyarország földrengés szempontjából legveszélyeztetettebb zónájának környékén számítjuk ki a talajgyorsulás átlagos értékét meghaladó valószínűséget a PSHA-egyenletek segítségével. Magyar nyelvű folyóiratokban vagy könyvekben a PSHA-módszer matematikai hátteréről csak keveset olvashatunk. E cikk célja, hogy az olvasó a valószínűségszámítás segítségével megértse a PSHA alkalmazását, illetve annak korlátait.

Kulcsszavak: földrengéskockázat, PSHA-módszer, talajmozgás-intenzitás, Cornell-modell

The goal of seismic hazard engineering analyses is to ensure that the planned structures can withstand a given level of ground shaking. There is a great deal of uncertainty about the location, size and resulting ground motion intensity of future earthquakes. Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) tries to quantify these uncertainties, and combine them to produce an explicit description of the future shaking that may occur at a site.

This work demonstrates the application of the method by specific calculative example. The probability (that is more than the average) of ground motion intensity

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víztudományi Kar, főiskolai docens, e-mail: fekete.arpad@uni-nke.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1435-8658>

is calculated by PSHA equations in the most dangerous zone of Hungary regarding earthquakes.

We can read only a little about the mathematical background of the PSHA method in Hungarian journals or books. The aim of this work is to help the reader understand the application and the limitations of PSHA with the help of the probability theory.

Keywords: seismic hazard, PSHA method, ground motion intensity, Cornell model

Bevezetés

A földrengés előrejelzésének legfontosabb stratégiai feladata annak meghatározása, hogy egy adott térségben mekkora erősségű földrengésre kell számítanunk egy bizonyos időszakban. A mérnökök ennek az információnak az ismeretében képesek a különböző létesítményeket a várható földrengésekkel szemben ellenállónak tervezni. A földrengéskockázat meghatározásánál alapvető feladat az, hogy kiszámítsuk a földrengés által okozott talajmozgás mértékét (általában a gyorsulást) és különböző spektrális jellemzőit a vizsgált helyszínen.

A földrengéskockázat elemzésére kétféle eljárás ismeretes: a determinisztikus és a valószínűségi módszer. A determinisztikus módszer (DSHA – Deterministic Seismic Hazard Assessment) hátránya, hogy erősen függ a környezet múltbeli szeizmikus tevékenységének ismertségétől, és elsősorban szeizmikusan erősen aktív területeken (lemezhatárokon) alkalmazható. E módszer alapfeltevése az, hogy a vizsgált terület közelében a szeizmikus aktivitás a jövőben ugyanolyan lesz, mint a múltban, és tudjuk, mekkora rengések várhatók a térségben [1].

Sokkal megbízhatóbb eredményeket kapunk a statisztikus, valószínűségi becslésen alapuló eljárással, amely PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) módszerként ismeretes. Célja, hogy a végeredményt jelentő veszélyeztetettségi szint mértékét a vízszintes irányú PGA (Peak Ground Acceleration), maximális talajgyorsulással jellemezze.

A PSHA-módszer

A módszer alkalmazásához, azaz a földrengéskockázat statisztikus becslése céljából egy földrengés-előfordulási eloszlást kell feltételeznünk [2]. Ez az általánosan használt eloszlási modell a Poisson-modell. Legyen ξ az a valószínűségi változó, amely azoknak a földrengéseknek a száma egy t időintervallumban, amelyeknek erőssége legalább M magnitúdójú. Ha τ jelöli a legalább M magnitúdójú földrengés átlagos ismétlődési idejét, akkor a Poisson-eloszlás szerint

$$P(\xi < 1) = F(1) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

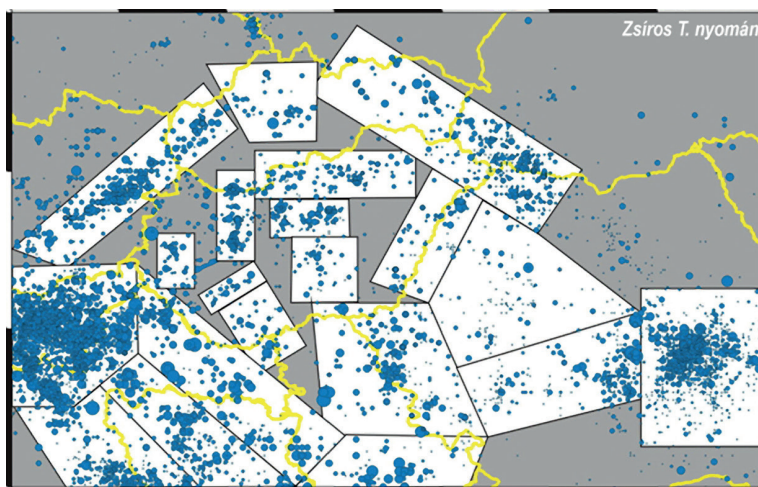
ami annak a valószínűsége, hogy egy adott t időintervallumban nem fordul elő M méretűnél nagyobb földrengés (F az eloszlásfüggvényt jelöli).

A PSHA alkalmazása során még feltesszük, hogy a földrengések egymástól függetlenek, valamint azt, hogy a tapasztalt földrengés-gyakoriság stacionárius. A PSHA eredménye általában egy adott időintervallumban és helyen várható maximális vízszintes irányú PGA-érték meghatározása. (Közönséges épületek tervezésénél százéves időszakon belüli csúcgyorsulás-értéket határoznak meg. A legnagyobb kockázatot jelentő atomerőművek és völgyzáró gátak tervezésekor egy tízezer éves időintervallumon belül várható legnagyobb PGA-értéket kell figyelembe venni [2].) A PGA egysége a g, $1g = 9,817 \text{ ms}^{-2}$. 0,001 g gyorsulás már érezhető, a 0,2 g esetén az emberek egyensúlyukat veszítik, míg a 0,5 g gyorsulásértéket csak az erre tervezett épületek bírják ki.

A PSHA-analízis öt lépésből áll. Az alábbi öt alfejezet ezeket tárgyalja.

A vizsgált területre ható forrászónák kijelölése

A forrászóna azt jelenti, hogy ezen belül hasonló tulajdonságokkal, hasonló valószínűséggel és gyakorisággal bíró földrengések keletkeznek véletlenszerűen. A forrászónák kijelölésének alapja a múltbeli szeizmicitás eloszlása, valamint a geológiai és a tektonikai ismeretek. A forrásterület lehet egy folt, azaz ténylegesen területgeometriájú, de lehet vonal is, amely egy vetőt reprezentál. Érdeemes megnézni a Pannon-medence lehetséges forrászónáit az 1. ábrán [3]. Ilyen térkép megszerkesztéséhez nagy segítség a földrengés-katalógus, amiben a vizsgált területen a múltban kipattant földrengések időpontját, földrajzi helyét és becsült erősségét sorolják fel.



1. ábra

A Pannon-medence forrászónáinak egy lehetséges kijelölése [3]

Magyarországon eddig 6 Richter-magnitúdónál vagy 9 fokos Mercalli-intenzitásnál nagyobb földrengést még alig észleltek, ezért definíció szerint Magyarország területét aszeizmikus területnek tekinthetjük, bár jelentősebb földmozgások nálunk is

előfordulhatnak. Ennek oka a Balkán-félszigeten húzódó Vardar-törésvonal (gyakorlatilag a Vardar-folyó völgye), amely Magyarország területén végződik, így aktivitása néha ránk is hatással van. Egy Richter-skála szerinti 5-ös erősségű rengés körülbelül 20 évente következhet be. A legutóbbi ilyen esemény az 1985-ös berhidai földrengés volt, 4,9-es értékkel. Magyarországon az eddigi legnagyobb rengés 1763. június 28-án következett be Komáromban, amely becslés szerint 6,3-as erősségű volt. A város egyharmada elpusztult és több mint hatvanan meghaltak [4].

Tapasztalati összefüggés meghatározása a földrengések magnitúdója és ezek egységnyi időtartam alatt várható száma között

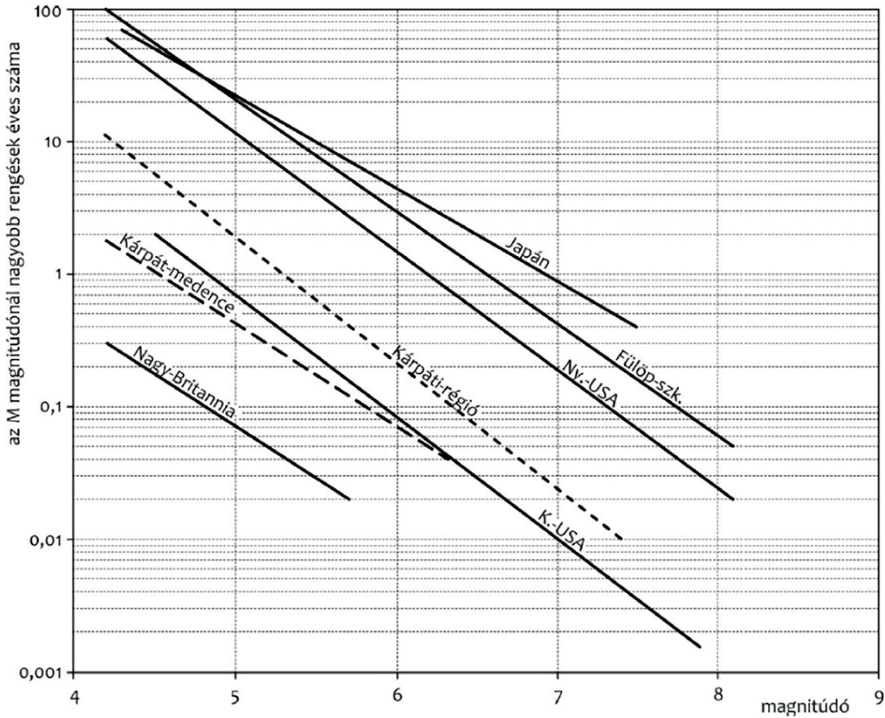
Beno Gutenberg és Charles Francis Richter 1956-ban közösen publikálták nevezetes egyenletüket:

$$\lg \lambda_m = a - bm, \quad (2)$$

ahol λ_m azon rengések gyakorisága, amelyek mérete legalább m magnitúdójú, a és b a területre jellemző állandók [5]. Az a és b konstansnak döntő befolyása van a végeredményre. Az a és b értékek meghatározásának alapja a regisztrált földrengés-tevékenység. A b együttható pozitív értékéből következik, hogy a kisebb méretű rengés gyakoribb, vagyis minél kisebb földrengésekről van ismeret, az együtthatók értéke annál több adatból számítható ki. Tehát érzékeny földrengés-megfigyelő rendszerrel a és b értéke még viszonylag rövid idő alatt is megbízhatóbbá tehető [1].

Érdemes a (2) egyenlet alapján megvizsgálni a földrengések éves számát a Föld különböző szeizmikus aktivitással jellemezhető részein.

Az egyes földrengésrégiók esetében az egyenes meredekségét meghatározó b érték csak kisebb eltéréseket mutat, ezért az egyenesek közel párhuzamosak. A földrengéses zónák aktivitása közti eltérést az a mutatja. A 2. ábráról látható, hogy Magyarország szeizmikus aktivitása nagyjából megegyezik az USA keleti részére jellemzővel, és messze elmarad az aktív területekétől (Japán, Fülöp-szigetek).



2. ábra

A földrengések éves száma a Föld különböző részein [2]

A (2) egyenlet segítségével megadható a rengések magnitúdójának kumulatív eloszlásfüggvénye (CDF – Cumulative Distribution Function), ami azt mutatja meg, hogy a rengések mekkora része kisebb egy adott m magnitúdójú rengésnél, feltéve, hogy a rengések egy m_{\min} minimális magnitúdónál nagyobbak [ezt a (3) képletben a feltételes valószínűség fejezi ki] [6]. Ezt azért érdemes bevonni a számításokba, mert az m_{\min} -nél kisebb magnitúdók hatástalanságuk miatt nem játszanak szerepet a mérnöki tervezésnél. Ha $F_M(m)$ jelöli az M valószínűségi változó kumulatív eloszlásfüggvényét, akkor

$$F_M(m) = P(M \leq m | M > m_{\min}) = \frac{\lambda(m_{\min} < M \leq m)}{\lambda(m_{\min} < M)} = \frac{\lambda m_{\min} - \lambda m}{\lambda m_{\min}} = \frac{10^{a-bm_{\min}} - 10^{a-bm}}{10^{a-bm_{\min}}} \quad (3)$$

$$= 1 - 10^{-b(m-m_{\min})}, \quad m > m_{\min}.$$

Ha $f_M(m)$ jelöli az M sűrűségfüggvényét, akkor deriválva a kumulatív eloszlásfüggvényt kapjuk, hogy

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \frac{d}{dm} [1 - 10^{-b(m-m_{\min})}] \quad (4)$$

$$= b \ln(10) 10^{-b(m-m_{\min})}, \quad m > m_{\min}.$$

A (4) egyenletet úgy kaptuk, hogy abban nincs meghatározva felső határ a magnitúdóra. Ha azonban megadunk egy maximális magnitúdót (m_{max}), feltételezve, hogy annál nagyobb erősségű földrengés kizárható egy adott területen, akkor a (3) és (4) a következőképpen módosul [6]:

$$F_M(m) = \frac{1-10^{-b(m-m_{min})}}{1-10^{-b(m_{max}-m_{min})}}, \quad m_{min} < m < m_{max}, \quad (5)$$

$$f_M(m) = \frac{b \ln(10) 10^{-b(m-m_{min})}}{1-10^{-b(m_{max}-m_{min})}}, \quad m_{min} < m < m_{max}. \quad (6)$$

A későbbi PSHA-egyenletekhez a magnitúdók folytonos eloszlását érdemes átalakítani magnitúdók diszkrét halmazává. Tekintsük az alábbi táblázatot:

1. táblázat

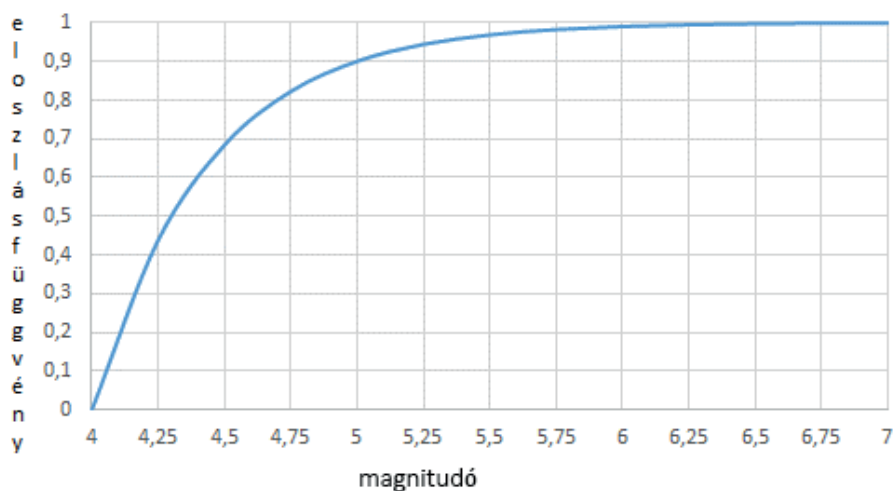
A magnitúdók valószínűségei [a szerző szerkesztése]

m_j	$FM(m_j)$	$P(M=m_j)$
4,00	0,0000	0,4381
4,25	0,4381	0,2464
4,50	0,6845	0,1385
4,75	0,8230	0,0779
5,00	0,9009	0,0438
5,25	0,9447	0,0246
5,50	0,9693	0,0139
5,75	0,9832	0,0078
6,00	0,9910	0,0044
6,25	0,9954	0,0024
6,50	0,9978	0,0014
6,75	0,9992	0,0008
7,00	1,0000	0,0000

Az első oszlopban az $m_{min} = 4$ és $m_{max} = 7$ és közötti magnitúdók vannak feltüntetve 0,25 közőkkel. A második oszlopban az (5) képlettel számított kumulatív eloszlásfüggvény szerepel, $b = 1$ választással. A harmadik oszlop adja meg a magnitúdók diszkrét értékeinek valószínűségeit a

$$P(M = m_j) = FM(m_j + 1) - FM(m_j) \quad (7)$$

összefüggéssel számolva. A kumulatív eloszlásfüggvényt mutatja a 3. ábra:



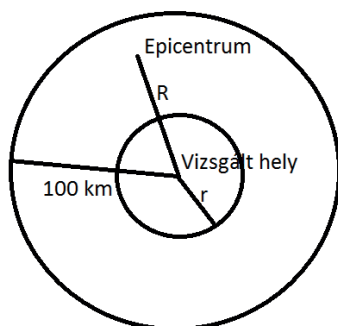
3. ábra

Az 1. táblázat alapján szerkesztett kumulatív eloszlásfüggvény [saját szerkesztés]

Távolságeloszlás meghatározása az epicentrumtól a vizsgált területig

A PSHA-egyenletekben szerepet játszik a vizsgált terület és az epicentrum távolságának eloszlása is. Feltesszük, hogy a vizsgált terület környezetében a földrengés kipattanásának valószínűsége azonos. A távolságeloszlás számítása az alábbi két példa segítségével könnyebben megérthető [6].

Az első példában a vizsgált helyünknek egy 100 km-es kör alakú környezetét vesszük, amelyben a földrengés kipattanásának helye bárhol fennállhat azonos valószínűséggel. Jelölje az R valószínűségi változó a helyünk és az epicentrum távolságát. Ezeket foglalja össze a 4. ábra:



4. ábra

Az 1. példa vázlatos illusztrációja [a szerző szerkesztése]

Annak valószínűségét, hogy az epicentrum a vizsgált helyünktől egy r távolságnál közelebb van, egyszerű geometriai valószínűséggel megadhatjuk:

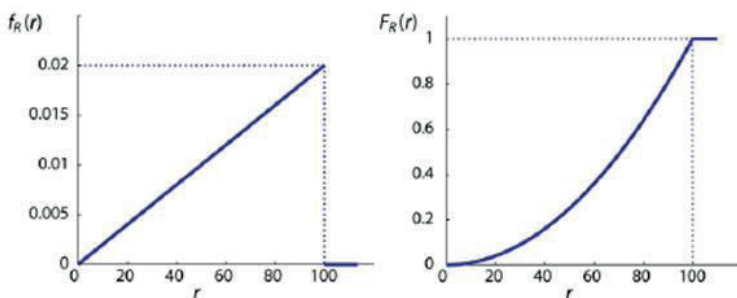
$$P(R \leq r) = F_R(r) = \frac{r^2 \pi}{10000\pi}. \quad (8)$$

Ez alapján felírható az eloszlásfüggvény és a sűrűségfüggvény:

$$F_R(r) = \begin{cases} 0 & , ha r < 0 \\ \frac{r^2}{10000}, & ha 0 \leq r < 100, \\ 1 & , ha r \geq 100 \end{cases} \quad (9)$$

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{5000}, & ha 0 \leq r < 100 \\ 0, & különben. \end{cases} \quad (10)$$

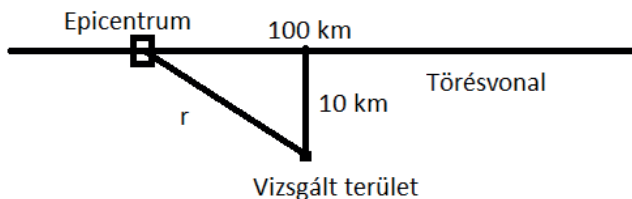
Az 5. ábra a (9) és (10) grafikonjait mutatja:



5. ábra

A vizsgált terület és az epicentrum távolságának sűrűség- és eloszlásfüggvénye [6]

A második példában az epicentrum egy 100 km hosszú törésvonalon bárhol kialakulhat és a vizsgált helyünk 10 km-re fekszik a törésvonaltól (6. ábra).



6. ábra

A 2. példa vázlatos illusztrációja [a szerző szerkesztése]

Ha az R valószínűségi változó jelöli a vizsgált terület és az epicentrum távolságát, akkor annak valószínűsége, hogy ez valamely r -nél kisebb (felhasználva a Pitagorasz-tételt

és azt a megfontolást, hogy az epicentrum a vizsgált hely jobb oldalán is lehet a 6. ábrán):

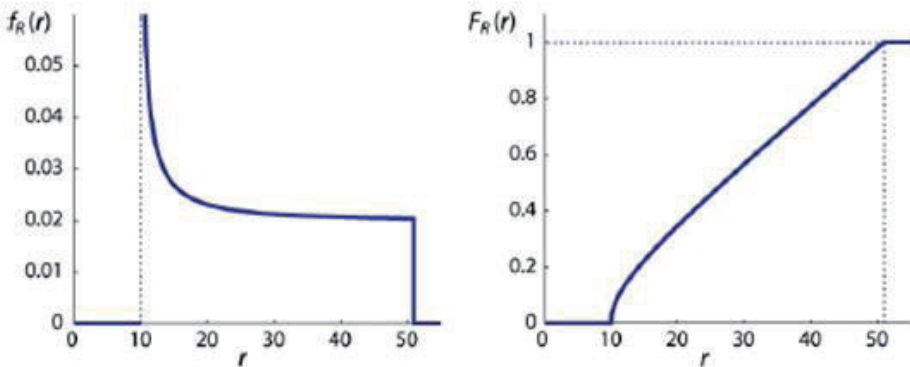
$$P(R \leq r) = F_R(r) = \frac{\text{a törésvonal hossza } r \text{ távolságon belül}}{\text{törésvonal hossza}} = \frac{2\sqrt{r^2-100}}{100}. \quad (11)$$

Ez alapján felírható az R valószínűségi változó eloszlásfüggvénye és sűrűségfüggvénye:

$$F_R(r) = \begin{cases} 0 & , \text{ ha } r < 10 \\ \frac{2\sqrt{r^2-100}}{100} & , \text{ ha } 10 \leq r < 51 \\ 1 & , \text{ ha } r \geq 51 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{50\sqrt{r^2-100}} & , \text{ ha } 10 \leq r < 51 \\ 0 & , \text{ különben.} \end{cases} \quad (13)$$

A (12) és (13) összefüggéseket szemlélteti grafikonnal a 7. ábra:



7. ábra

A vizsgált terület és az epicentrum távolságának sűrűség- és eloszlásfüggvénye [6]

A talajmozgás intenzitásának vizsgálata

Megvizsgáljuk, hogy a forrászónától a vizsgált területig hogyan csökken a földrengés által keltett maximális vízszintes PGA² értéke. Ennek elemzésére tekintünk az alábbi

² PGA (Peak Ground Acceleration) maximális talajgyorsulás.

talajmozgás-intenzitás előrejelző modellt, amely valószínűségi eloszlást ad az intenzitásra [7]:

$$\ln IM = \overline{\ln IM}(M, R, \theta) + \sigma(M, R, \theta) \cdot \varepsilon, \quad (14)$$

ahol $\ln IM$ a talajmozgás-intenzitás mérték (általában PGA) természetes alapú logaritmus (IM – Intensity Measure). Az $\ln IM$ valószínűségi változó és normális eloszlással jól prezentálható. Az $\overline{\ln IM}(M, R, \theta)$ és a $\sigma(M, R, \theta)$ tagok a modell kimenetelei, amelyek az $\ln IM$ feltételezett közepét, illetve szórását jelölik. Ezek a magnitúdó, a távolság és θ (egyéb paraméterek) függvényei. Az ε standard normális valószínűségi változó, amely $\ln IM$ -ben a megfigyelt variabilitást jellemzi.

A (14) egyenlet igen általános, ezt jobban megérthetjük, ha Carl Allin Cornell számítását figyelembe vesszük a PGA logaritmusának feltételezett közepére vonatkozóan [7]:

$$\overline{\ln PGA} = -0,152 + 0,859M - 1,803 \ln(R + 25). \quad (15)$$

Cornell az $\ln PGA$ szórását 0,57-nek veszi és a modelljében minden magnitúdó és távolság konstans. A PGA természetes alapú logaritmus normális eloszlású valószínűségi változó, így könnyen kiszámítható annak valószínűsége, hogy egy bizonyos szintet meghalad a PGA:

$$P(PGA > x | m, r) = 1 - P(PGA \leq x | m, r) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln x - \overline{\ln PGA}}{\sigma_{\ln PGA}}\right). \quad (16)$$

A (16) egyenlet bal oldalán szereplő valószínűség a PGA sűrűségfüggvényének segítségével is felírható:

$$P(PGA > x | m, r) = \int_x^{\infty} f_{PGA}(u) du. \quad (17)$$

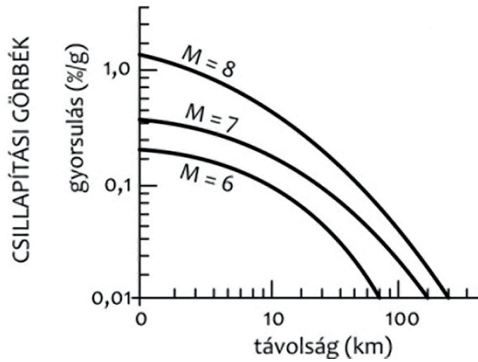
Tekintsünk a (16) egyenletre konkrét számítási példát. Legyen adott egy 6-os erősségű földrengés, és azt vizsgáljuk, hogy az epicentrumtól 3, 10 és 30 km távolságra hogyan változik annak valószínűsége, hogy a PGA meghaladja a 0,5 g-t. Ez a gyorsulásérték kritikus, mert ezt, mint említettük, csak az erre tervezett épületek bírják ki.

Először a (15) egyenlettel kiszámítjuk az $\ln PGA$ feltételezett közepét, amelyek 3, 10, 30 km távolságok esetén rendre -1,006, -1,408, -2,223. Az $\ln PGA$ szórása 0,57, ez változatlan. Így

$$\begin{aligned} P(PGA > 0,5 | 6, 3) &= 1 - \Phi\left(\frac{\ln 0,5 - (-1,006)}{0,57}\right) = 1 - \Phi(0,55) = 0,2912 \\ P(PGA > 0,5 | 6, 10) &= 1 - \Phi\left(\frac{\ln 0,5 - (-1,408)}{0,57}\right) = 1 - \Phi(1,25) = 0,1056 \\ P(PGA > 0,5 | 6, 30) &= 1 - \Phi\left(\frac{\ln 0,5 - (-2,223)}{0,57}\right) = 1 - \Phi(2,68) = 0,0037 \end{aligned} \quad (18)$$

Látható, hogy 3 km-es távolságban a 0,2912 komoly valószínűség, így ezt a tervezésnél kötelező figyelembe venni, de még 10 km-es távolságban a körülbelül 10%-os

valószínűség is figyelemreméltó. A 7. ábra a 6, 7, 8 magnitúdójú rengések PGA-jának csillapódásait mutatja a távolság függvényében.



8. ábra

Csillapítási görbék a távolság függvényében [2]

A PSHA-egyenletek felírása az eddigi információk segítségével

A (14) összefüggésben már szerepelt az intenzitási mérték (IM) mint valószínűségi változó. Most már fel tudjuk írni azt az egyenletet, amely megadja azt a valószínűséget, hogy az intenzitási szint meghalad egy bizonyos x szintet [6]:

$$P(IM > x) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm, \quad (19)$$

ahol $P(IM > x|m, r)$ a (16), $f_M(m)$ a (6), míg $f_R(r)$ a (10) vagy (13) formulából számolható ki. Ez az egyenlet azonban nem ad tájékoztatást a földrengések gyakoriságáról a vizsgált területen. A (19) egyenletben a $P(IM > x)$ valószínűség helyett azonban vizsgálhatjuk annak $\lambda(IM > x)$ gyakorisági rátáját. A $\lambda(M > m_{min})$ jelölje annak gyakorisági rátáját, hogy a földrengés erőssége nagyobb, mint m_{min} .

Mivel $P(IM > x) = \frac{\lambda(IM > x)}{\lambda(M > m_{min})}$, ezért annak gyakorisága, hogy a földrengés intenzitása meghalad egy bizonyos x szintet [6]:

$$\lambda(IM > x) = \lambda(M > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (20)$$

Az előbbi egyenlet csak egy lehetséges kipattanási hellyel számol a vizsgált terület közelében, de előfordulhat, hogy a közelben több forrászóna lehet. Ekkor a (20) egyenlet tovább általánosítható. Legyen n db forrászónánk, ekkor felírható, hogy

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^n \lambda(M_i > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x|m, r) f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dr dm. \quad (21)$$

Praktikusabb azonban a számításokhoz a (21) egyenlet diszkrétizált változatát használni [6]:

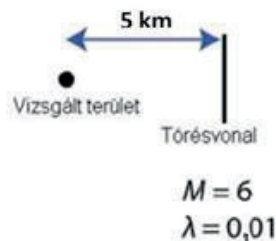
$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^n \lambda(M_i > m_{min}) \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(IM > x|m_j, r_k) P(M_i = m_j) P(R_i = r_k), \quad (22)$$

amiben a $P(M_i = m_j)$ kiszámításához a (7) összefüggést alkalmazzuk.

A (21) és (22) egyenleteket *PSHA-egyenleteknek* nevezzük. Az eredmény, azaz egy bizonyos intenzitási szint meghaladási rátája nagyon hasznos mérnöki döntések meghozatalakor, rengésbiztos építmények tervezése kapcsán. A következő fejezet példát ad ezen egyenletek gyakorlati alkalmazására, megértésére.

PSHA-számítás Magyarország legvesélyeztetettebb területére

Példánkban azt elemezzük, hogy Magyarországon a legvesélyeztetettebb zónában, azaz a Balaton északi csücskétől Komáromig húzható széles sávban, az úgynevezett Móri-árok környékén milyen valószínűséggel haladja meg a talajgyorsulás a 0,4 g értéket, ami már komoly károkat is okoz. Magyarországon, mint már említettük, 6 Richter-magnitúdónál nagyobb földrengést csak keveset észleltek (ezek is körülbelül 100 évente egyszer fordulnak elő a földrengéskatalógusok történelmi megfigyelései alapján). Tekintsük tehát az említett vonalat, ahol $M = 6$ erősségű földrengés pattan ki, $\lambda = 0,01$ éves gyakorisággal. A vizsgált helyünk legyen 5 km-re a törésvonaltól (9. ábra):



9. ábra

A számítás adatai [a szerző szerkesztése]

A Cornell-modell alapján, azaz (15)-be behelyettesítve az adatokat $\overline{\ln PGA} = -1,1303$, amiből a talajgyorsulás átlagos értékére, azaz \overline{PGA} -ra 0,3229 adódik és $\sigma_{\ln PGA} = 0,57$ a standard érték. Használjuk a (22) egyenletet:

$$\lambda(PGA > x) = \lambda(M > m_{min})P(PGA > x|6; 5)P(M = 6)P(R = 5) = 0,01P(PGA > x|6; 5). \quad (23)$$

Az egyenlet jobb oldalát kiszámítva:

$$P(PGA > x|6; 5) = 1 - \phi\left(\frac{\ln x - (-1,1303)}{0,57}\right). \quad (24)$$

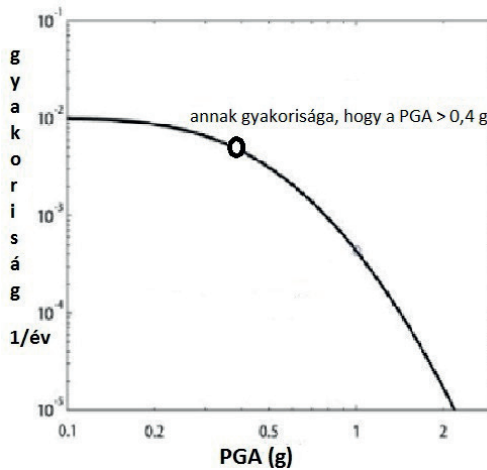
Ebből bármely x értékre ki tudjuk számítani a valószínűséget. Nézzük meg azt a valószínűséget, hogy a talajgyorsulás meghaladja a 0,4 g értéket:

$$P(PGA > 0,4|6; 5) = 1 - \phi(0,3754) = 0,352. \quad (25)$$

Ezt (23)-ba helyettesítve megkapjuk a gyakoriságot is:

$$\lambda(PGA > 0,4) = 0,01 \cdot 0,352 = 0,00352. \quad (26)$$

Ez azt jelenti, hogy körülbelül 284 évente fordulhat elő a vizsgált zónánkban nagyon komoly károkat okozó, 0,4 g-nél nagyobb földrengés (A földrengéstörténeti katalógus alá is támasztja ennek a számításnak a megbízhatóságát). Ha a számításokat kellően sok PGA-szintre kiszámítjuk, akkor kirajzolódik a veszélyeztetettségi görbe, amely megadja annak gyakoriságát, hogy egy bizonyos mértéknél nagyobb talajgyorsulásra hány évente kell számítanunk. Ezt a görbét szemlélteti a 10. ábra:



10. ábra

A veszélyeztetettségi görbe [a szerző szerkesztése]

A módszerről levont következtetések, hiányosságok

A PSHA-eljárás, mint láttuk valószínűségi becslést ad a földrengések által egy adott helyen keltett maximális vízszintes gyorsulás értékének meghatározására. A tervezés szempontjából azonban van egy másik kulcsfontosságú paraméter, a *rengések frekvenciája*.

A felszíni mozgás egy adott helyen különböző frekvenciájú hullámkomponensek szuperpozíciójaként áll elő. Ezen komponensek frekvenciája általában 0 és 15 Hz között van, ezt nevezik frekvenciatartalomnak. A mozgás frekvenciatartalmát a mérnöki gyakorlatban használatos válaszspektrummal jellemzik.

Ugyanazon rengésre ugyanazon a helyen a különböző épületek is eltérően reagálnak. Először igen összetett módon kezdenek el mozogni, majd rezgésük frekvenciája fokozatosan egy adott érték felé tolódik el, ezt az épület *sajátfrekvenciájának* nevezik. Gyakran használják a *sajátperiódus* kifejezést is, ami a sajátfrekvencia reciproka, és azt adja meg, hogy az mennyi idő alatt tesz meg egy teljes lengést [8]. Általában minél magasabb egy épület, annál alacsonyabb a sajátfrekvenciája, vagyis hosszabb a sajátperiódusa. Az alábbi (2.) táblázat néhány építményre jellemző sajátperiódusról ad tájékoztatást:

2. táblázat

Építmények sajátperiódusa/frekvenciája [8]

Építmény típusa	Tipikus sajátperiódus/frekvencia
egyszerű tartószerkezetek	0,1 s / 10 Hz
2 szintes épületek	0,2 s / 5 Hz
5 szintes épületek	0,5 s / 2 Hz
10–20 szintes épületek	1–2 s / 0,5–1 Hz
felhőkarcolók, függőhidak	2–6 s / 0,16–0,5 Hz

Az épületek akkor szenvedik el a legnagyobb kárt, amikor a talajmozgással rezonancia-ába kerülnek, vagyis amikor a földrengéshullámok legnagyobb energiájú összetevőinek frekvenciája és az épület sajátfrekvenciája megegyezik [8].

Az utóbbi évek tapasztalata azt mutatja, hogy a földrengésveszély mértékét sokszor nem maga a földrengés, hanem az általa generált természeti jelenség határozza meg. Például a 2001. január 13-án a Csendes-óceán alatt, Salvadortól mintegy 100 km-re kipattant $M = 7,6$ erősségű földrengés tragikus következményeit az általa kiváltott földcsuszamlások okozták [2]. A szeizmológiai szakirodalomból jól ismertek a *rengések okozta földcsuszamlások*. Ezek oka az, hogy a talajviszonyok a szeizmikus hullámok erős rázó hatása miatt megváltoznak. Így a rengés hegvidéki területeken az erózió miatt már eleve meglazult kőzetek leomlását vagy az esővízzel átitatott, átázott talajrétegek lecsúszását eredményezi.

Nehezen kiszámítható még a földcsuszamlásokon kívül a *talajfolyósodás* jelenségének következménye. A hosszan tartó erős mozgások előidézhetik a vizes, laza szemcsés talajok szilárdságának elvesztését és folyadékserű viselkedését, azaz a talajfolyósodást. A jelenség oka az, hogy az erős rázkódás hatására a laza szemcsés anyag

tömörödni kezd. Ekkor a benne lévő hézagok térfogata lecsökken, ami miatt a benne lévő víz nyomása – ha nem tud valahová elfolyni – megnő. Ha a pórusvíz nyomása eléri a fölötte lévő talajrétegek nyomását, akkor ez az anyag úgy kezd el viselkedni, mint egy viszkózus folyadék, elveszíti teherhordó-szilárdságát, és korlátlanul deformálódhat [9]. Lejtős terepen már néhány fokos lejtőnél is előfordulhat, hogy ha egy felszín alatti talajrétegben következik be az elfolyósodás, akkor a gravitációs erő miatt a felszíni, nem elfolyósodott rétegek elmozdulnak lefelé, a lejtő irányába, akár több tíz métert is megtéve. A mozgás már nagyon enyhe (egy fok alatti) lejtőknél is megindulhat, károsítva a csővezetéseket, közműveket, sekély alapozású szerkezeteket. Elfolyósodás bekövetkezésekor, ha egy épület alapozása ilyen rétegben található, a rengés annak kiemelkedését, süllyedését vagy felborulását okozhatja.

A 2004. december 26-án kipattant szumátra-andamáni ($M = 9,1$) és a tóhokui 2011. március 11-ei ($M = 9,0$) gigantikus földrengések okozta hatalmas veszteségek nem magának a földrengésnek, hanem az általa keltett *szökőárnak* a következményei. Hiába volt meglehetősen pontosan meghatározva Tóhokunál a vízszintes PGA, ha a károkat döntő mértékben előidéző szökőárral kapcsolatos veszélyeztetésre vonatkozóan nem történt megfelelő prognózis [2].

A földrengésveszély számításának eljárásai nem terjednek ki az *utóregések* lehetséges hatására sem. A legnagyobb utóregések igen jelentős szeizmológiai terhelést jelentenek, s ezek sokszor hosszú idő elteltével következnek be. Például Chilében 2010. február 27-én $M = 8,8$ erősségű földrengés pattant ki, és ez 2011 februárjában több nagy utóregést produkált, amelyek közül a legnagyobb $M = 6,8$ erősségű volt [2].

Földregések intenzitását alapvetően határozza meg a vizsgált hely geológiája, *talajviszonya*. Nagyon sok földrengésnél megfigyelték, hogy azokon a helyeken, ahol a felszín közelében fiatal, laza, homokos és agyagos üledékek találhatók, sokkal nagyobb károk keletkeztek, mint ott, ahol keményebb kőzetek bukkannak a felszínre. Az intenzitás növekedése még erőteljesebben jelentkezik mesterségesen feltöltött területeken. Egy $M = 6,0$ méretű földrengés esetén például a maximális vízszintes gyorsulás értéke 0,2 és 0,3 g között változik, ha a felszíni kőzet kemény, sziklás; 0,3–0,5 g, ha ez átlagos üledék, és végül 0,5–1,0 g laza üledék vagy feltöltés esetén [2]. Ugyanazon földrengés epicentrumától ugyanolyan távol fekvő helyek között akár 2 intenzitáskülönbség is előfordulhat. Szűkebb területen, településen belül is igen változatosak lehetnek a talajviszonyok, aminek következtében különböző súlyosságú károk keletkeznek.

Összefoglalás

Összegzésképpen elmondható, hogy a földrengéskockázat-elemzésnek sok hiányossága van. Sajnos mind a mai napig nem sikerült megbízható módszert találni az előrejelzés megoldására, sőt egyes vélemények szerint a földrengés kipattanása olyan sok tényezőtől függ, a folyamat olyan kaotikus, hogy pontos előrejelzésre sohasem lesz mód. Lehetőség van azonban a földrengéskockázat valószínűségi alapú meghatározására, vagyis annak kiszámítására, hogy valamely területen megadott méretű talajrázkódás adott időszak alatt milyen valószínűséggel várható. Kiszámítottuk ilyen

módon a PSHA-egyenletek segítségével Magyarország földrengés szempontjából legveszélyeztetettebb területén a talajgyorsulás 0,4 g értékét meghaladó valószínűségét.

A földrengéskockázat ismeretében történő előzetes felkészüléssel a földrengés által okozott károk és veszteségek csökkenthetők. Az előzetesen végrehajtott kárenyhítő intézkedések körébe tartozik egyebek mellett az építmények telephelyének megfelelő kiválasztása, az épület- és gépészeti szerkezetek földrengésálló tervezése, kivitelezése.

Hivatkozások

- [1] P. Mónus, L. Tóth és K. Gribovszki, „A földrengéskockázat fogalma és meghatározási módszerei,” *georisk.hu*, 2002, [Online]. Elérhető: http://georisk.hu/Tothetal/2002_gykonf_mptlgk.pdf (Letöltve: 2019. 05. 31.)
- [2] P. Varga, „Földrengések előrejelzése,” *Magyar Tudomány*, 172. évf. 7. sz., pp. 843–860., 2011.
- [3] T. Zsíros, „A Kárpát-medence szeizmicitása és földrengés veszélyessége,” in *Magyar Földrengés Katalógus 456-1995*. MTA GGKI, 2000.
- [4] P. Varga, „Földrengések a történelemben. Komárom katasztrófája 1763-ban,” *História*, 20. évf. 8. sz., pp. 22–25., 1998.
- [5] B. Gutenberg and C. F. Richter, „Magnitude and energy of Earthquakes,” *Annali di Geofisica*, vol 9, no. 1. pp. 1–15, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1038/176795a0>
- [6] J. Baker, „An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA),” *web.stanford.edu*, 2008, [Online]. Elérhető: [https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_\(2008\)_Intro_to_PSHA_v1_3.pdf](https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_(2008)_Intro_to_PSHA_v1_3.pdf) (Letöltve: 2019. 05. 04.)
- [7] C. A. Cornell, „Engineering Seismic Risk Analysis,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606, 1968.
- [8] L. Tóth, P. Mónus és T. Zsíros, „Földrengések hatása épületekre,” *foldrenges.hu*, [Online]. Elérhető: www.foldrenges.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=20:foeldrengesek-hatasa-epueletekre&catid=19&Itemid=23 (Letöltve: 2019. 04. 28.)
- [9] L. Tóth, „A lokális geológiai viszonyok hatása a telephelyen várható gyorsulásokra (A felső laza rétegek intenzitás módosító hatása, spektrális karakterisztikái),” *Magyar Geofizika*, 31. évf. 5–6. sz., pp. 143–161., 1990.