

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXI. évfolyam

4. szám

2011. április

## A PAKSI ATOMERŐMŰ FÖLDRENGÉSBIZTONSÁGA

Katona Tamás  
Paks Atomerőmű Zrt.

### Az atomerőművek biztonságáról

Az atomreaktorok akkor biztonságosak, ha minden körülmények között a láncreakció leállítható, a reaktor lehűthető, a hűtés folyamatosan biztosítható és a radioaktív közegek nem kerülnek ki a környezetbe.

Az első követelmény érthető, hiszen így megállítható a maghasadásokból származó energiatermelés, illetve a láncreakció ellenőrizetlen felgyorsulása is kizárható. Ezt a funkciót neutronelnyelő anyagok reaktorba való bejuttatásával lehet elérni, ami történhet abszorbens rudakkal vagy a hűtőközegben oldott abszorbenssel, a gyakorlati esetekben bórral.

A leállított reaktor hűtésére azért van szükség, mert a maghasadás következtében az üzemanyag magokból, mint az  $U^{235}$ , instabil magok keletkeznek különféle bomlási láncok eredményeként. Az instabil magok természetének megfelelően különböző idő alatt stabil magokká alakulnak, és ebben a folyamatban hő keletkezik, amit maradványhő-képződésnek nevezünk. Ezt a hőt több okból is ki kell vonni a rendszerből:

– Az üzemanyag ne hevüljön túl, megmaradjon szerkezeti integritása, ami mind a hűhetőségnek, mind a reaktivitás kézben tartásának feltétele. Együttal a radioaktív anyagok visszatartása szempontjából is fontos, hiszen az üzemanyag (megjelenését tekintve egy kerámia) anyagában visszatartva marad ekkor az aktivitás nagy része, a gáznemű és halogén anyagok kivételével.

– A lehűtött rendszerben alacsony nyomást lehet tartani, ami azért fontos, mert legyen bár a legkisebb tömörtelenség a reaktor aktív zónáját magában foglaló rendszeren, azon a külső és a belső nyomás közötti különbség a szivárgás hajtóereje, aminek célszerű a legkisebbnek lenni.

– A harmadik ok pedig az, hogy az üzemanyag-pasztilákat magába foglaló csövecskék anyaga cirkónium, amely  $1200\text{ °C}$  felett a vízgőzzel reakcióba lép-

ve oxidálódik, és ennek következtében hidrogén keletkezik. A hidrogén, mint robbanóképes gáz jelenléte a rendszerben új veszélyt jelent, ezért erre az esetre ma már az atomerőművekben, így a paksi erőműben is, hidrogén rekombinátorokat telepítenek a robbanás-képes hidrogénkoncentráció kialakulásának megelőzése céljából.

A hűtéshez, az üzemzavari hűtőrendszerek működéséhez két dolog feltétlenül kell: hűtőközeg, azaz a könnyűvízes reaktorokban víz, valamint villamos energia a hűtőrendszer és az erőmű állapotáról elengedhetetlen információt szolgáltatató műszerek működtetéséhez.

A maradványhő termelése – egyea magok gyors stabil állapotba kerülésének köszönhetően – rohamosan csökken, és amíg a reaktor leállítása után ez az üzemi teljesítmény 7%-át teszi ki, néhány óra után már egy százaléknyi, majd néhány nap után ez a teljesítmény a százalék tört része lesz. A kiégett és a reaktorból kirkott üzemanyag hőtermelése általában öt év után éri el azt a szintet, hogy átmeneti tárolókba helyezhető legyen, addig a kiégett üzemanyag a reaktorok melletti tárolókban folyamatos hűtés mellett tárolható.

A radioaktív anyagok visszatartását több fizikai gát biztosítja: az üzemanyag maga, az üzemanyagot magába foglaló burkolat, a reaktor és a primérgör szerkezete mint nyomástartó rendszer és legvégül a konténment szerkezete.

A biztonsághoz elengedhetetlen funkciók nagy megbízhatóságát három konstrukciós elv alkalmazása szolgálja:

– Az adott funkciót megvalósító rendszerek többszörözése, akár négyszeres redundanciával. Így például a paksi atomerőműben a vészhelyzeti villamosenergia-ellátást minden blokkon három dízelgenerátor biztosítja, amelyek teljesítménye egyenként is elégséges az üzemzavari energiaigény kielégítésére, és ezen kívül van még biztonsági akkumulátortelep is.

– Az azonos funkciót teljesítő rendszerek egymástól eltérő gyártmányú, kivitelű, működési elvű elemekből épülnek fel, ezzel csökkentve annak lehetőségét, hogy a redundáns rendszerek egy időben essenek ki, hiszen az azonos elemek azonos módon és időben hibásodhatnak meg.

– A redundáns biztonsági rendszerek térbeli szétválasztása pedig azt szolgálja, hogy egy tűz vagy más meghibásodás egyszerre ne érhesen több rendszert is.

Az atomerőművek biztonsága magában foglalja a földrengésekkel és más természeti katasztrófákkal szembeni biztonságot. Erre ismét ráirányította a figyelmet a japán Honshu-sziget keleti partjának közelében 2011. március 11-én bekövetkezett földrengés, majd az azt követő szökőár.

## Mi történt a Fukushima Daiichi atomerőműben?

2011. március 11-én hatalmas, kilences magnitúdójú földrengés pattant ki Japán keleti partjától mintegy 150 km-re. Ez a földrengés méretében jóval meghaladta a Japán-árok mentén a huszadik században észlelt rengéseket, amelyek mind 8l körüli magnitúdójúak voltak, és a 869-ben történt nagy rengéshez hasonló, amelyet követően Sendai várost elpusztította a szökőár. Ez a rengés egyike az elmúlt száz év legnagyobb földrengéseinek.

A rengés által érintett területen öt atomerőmű-telephely van 15 atomerőművi blokkal, ebből három, az Onagawa, a Fukushima Daiichi és a Fukushima Daini összesen 13 blokkja a földrengés és a cunami által legjobban érintett partszakaszon. A földrengést követően minden üzemelő reaktor automatikusan leállt és elindult a reaktorok lehűtése. Az erőművekben, a 13 blokkon semmilyen, a biztonságot veszélyeztető kár nem történt. Így volt ez a Fukushima Daiichi erőműben is, ahol hat blokk van, amelyek közül három üzemben volt a földrengés előtt, három pedig karbantartáson. A földrengés után mintegy egy órával ért le a szökőár a Fukushima Daiichi atomerőmű telephelyére és teljesen tönkretette a villamos energiát adó dízelgenerátorokat. Ettől a kezdve a véges időtartamra elégséges és korlátozott teljesítményű akkumulátorok álltak rendelkezésre a reaktorok hűtéséhez. Mobil dízelgenerátorok helyszínre szállítására, vagy a villamosenergia-ellátás helyreállítására volt szükség egy olyan hátszóról, ahol rendkívüli állapotok uralkodtak a földrengés és a cunami következtében. A hűtés elvesztése után rendkívüli állapotot hirdettek ki az atomerőműben, és elkezdtek a környéken lakók kitelepítését. Ezek után lényegében az alábbi eseménysorozat indult el minden blokkon:

A hűtés hiányában a hőmérséklet és ezzel együtt a nyomás is megnőtt a reaktorokban. A reaktor sérülését megelőzendő a reaktorokat lefűvatták a belső, acél konténmentbe. Megjegyezzük, a biztonságra való tervezés elveinek megfelelően kettős konténment van, egy belső acélkonténment és egy külső vasbeton. Ám egy idő után a belső konténmentekben is

Nagy földrengések		
dátum	hely	magnitúdó
1960. 05. 22.	Chile	9,5
1964. 03. 28.	Prince William, Dél-Alaszka	9,2
2004. 12. 26.	Andaman-szigetek, Szumátra	9,1
2011. 03. 11.	Honshu, Japán	9,0
1952. 11. 04.	Kamcsatka, Oroszország	9,0
1868. 08. 13.	Arica, Peru (most Chile)	9,0
1700. 01. 26.	Cascadia-zóna (Egyesült Államok, Kanada)	9,0

Forrás: U.S. Geological Survey honlap

veszélyes túlnyomás alakult ki, amelyet a konténment sérülését megakadályozandó lefűvattak. A túlhevült üzemanyag-burkolat oxidációja során keletkező és kiszivárgó hidrogén felrobbant és lerombolta a reaktor feletti csarnokot. Ez az eseménysorozat következett be mindhárom blokkon, különbség a hidrogénrobbanás helyében, a konténment állapotában van. A reaktorok üzemzavari hűtését ebben a helyzetben csak rendkívüli eszközökkel, tengervíz bejuttatásával lehetett biztosítani, amihez a reaktivitás kontrollja érdekében még bőrt is keverték. A lefűvattások során, majd a sérüléseken főleg gáznemű aktív anyagok és jód került a környezetbe. A sérült üzemanyagból is került ki radioaktív anyag, de ennek mennyisége és szétszóródása korlátos.

A pihentető medencékben lévő üzemanyag hűtése és felmelegedése volt a második gond, amivel meg kellett küzdeni. A túlhevülés itt is kibocsátásokhoz vezetett.

A helyzetet súlyosbították a tüzek, amelyek a blokkokon lévő kábelek és egyéb éghető anyagok kigyulladásából és hidrogénrobbanásokból keletkeztek.

A helyzet még továbbra is súlyos, bár időközben helyreállították a telephely villamosenergia-ellátását. A biztonsági rendszerek, így a reaktor és a pihentető medencék hűtésének helyreállítása még igen bonyolult és megoldandó feladat. Nap mint nap várhatók még komplikációk az elhárítási munkálatok során, de ma már biztosak lehetünk abban, hogy a folyamat a reaktorok és a pihentető medencék feletti teljes ellenőrzés megvalósítása felé halad.

A sérült három reaktorblokk, mint termelő kapacitás elveszett, helyreállíthatatlan, azokat megfelelően el kell zárni a környezettől. A környezetbe kijutott aktivitás a katasztrófa méreteihez képest és a csernobili katasztrófában kibocsátotthoz képest igen mérsékelt. Az evakuálásnak köszönhetően a lakosság biztonságban van. Bár a környezetben, sőt igen nagy távolságokon is mérhető a japán nukleáris kibocsátásból származó sugárzás, de a mérhetőség még nem jelent egészségi kockázatot, és ennek a kibocsátásnak hazánkban egészségügyi kockázata nincsen. A sugárzás szintje, illetve a radioaktív jód és cézium koncentrációja az atomerőmű környezetében is jelentősen szór, az ivóvíz és a zöldségfélék fogyasztására korlá-

tozások vannak az atomerőmű körzetében (2011. március 31-én, lásd <http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html>).

Fentiekből látható, hogy az egyik alapvető biztonsági funkció elvesztése, azaz a reaktor, illetve a kiégett üzemanyag hűtésének elvesztése a szükség villamosenergia-ellátás elvesztése következtében milyen súlyos következményekkel jár, egyebek közt a másik biztonsági funkció, az aktív közegek visszatartása is sérül. Igaz, ehhez nem volt elég a világ egyik ismert legnagyobb földrengése (1. táblázat), ehhez egy, a tervben figyelembe vettél jóval nagyobb szökőár is kellett.

## A paksi atomerőmű földrengésbiztonsága

Jogosan merül fel a kérdés, mennyire biztonságos a paksi atomerőmű egy súlyos természeti katasztrófa, egy a paksi telephelyen elképzelhető nagy földrengés esetén. Ennek megértéséhez két dolgot kell tisztázni:

1. Milyen földrengésre lehet számítani a paksi telephelyen, illetve milyen földrengésre kell tervezni az atomerőművet?

2. Hogyan lehet az atomerőművet földrengésbiztossá tenni, s ehhez mit kellett tenni a paksi atomerőműben?

## Mekkora földrengésre kell tervezni az atomerőművet?

Az olyan aktív területeken, mint a japán szigetek, is óriási történelmi és műszeres adatbázis áll rendelkezésre ahhoz, hogy egy telephelyen várható legnagyobb földrengést ennek alapján meg lehessen határozni. Ez az ismeretanyag az alapja a telephelyi földrengésveszély determinisztikus módszerrel történő meghatározásának. Az olyan területeken, mint a Pannon-medence, ahol a szeizmicitás nem ennyire kifejezett, és az erre vonatkozó ismereteink is bizonytalanabbak, valószínűségi módszert alkalmaznak a telephely földrengés-veszélyeztetettségének meghatározására, amely módszer épp a bizonytalanságok megfelelő figyelembe vételére alkalmas.

Az atomerőműveket általában a tízezer év alatt előforduló legnagyobb földrengés hatásaira, az általa kiváltott telephelyi gyorsulásokra kell tervezni, míg a nem nukleáris létesítmények esetében a 475 év alatt elképzelhető legnagyobbra.

A földrengéseket, így az atomerőmű tervezéséhez meghatározott, tízezer év alatt előforduló legnagyobb rengést is jellemezni kell. A földrengés erősségének jellemzésére különféle skálákat használnak. A legelterjedtebb a Richter-skála, amely a rengés magnitúdóját adja meg és a rengésben felszabaduló energiával arányos. Az érzékelhető rengések magnitúdója 2-nél nagyobb. A történelmi feljegyzésekből és a mérésekből ismert magyarországi földrengések magnitúdója kisebb mint 6,6. A legnagyobb az érmelléki rengés volt, a sokak által megélt berhidai rengés magnitúdója  $\approx 4,9$  volt.

Használnak még olyan skálákat, amelyek a földrengés által okozott károk szerint kategorizálnak, általában 12 fokozatú skálán. Az intenzitásskálán a fokozatok a tapasztalt károk fenomenológikus leírása alapján határozhatók meg, például megbillenek a kémények, téglafalak megrepednek.

A tervezéshez azonban olyan input kell, amely a kárt okozó közvetlen hatást jellemzi. Ez pedig a talajmozgás, annak is a gyorsulása, sebessége, illetve az elmozdulás. A tervezés során a talajgyorsulást (legtöbbször annak vízszintes összetevőjét) szokták inputként használni, amelyet a gravitációs gyorsulás ( $g$ ) hányadában adnak meg. Például, a mostani japán földrengés során az átlagos talajgyorsulás 0,3–0,35  $g$  közötti értéket mutatott a partközeli területeken.

Mivel a mérnöki munkákban használt, egy konkrét telephelyen feltételezhető talajgyorsulás és a terület megrázó, valahol kipattanó rengés magnitúdója között csak minőségi összefüggés van, technikailag nem szakszerű az olyan kijelentés, hogy az atomerőművet valamilyen magnitúdójú földrengésre tervezték, s főleg nem méretezték, ámbár a közbeszédben és a médiában ezt használják.

A biztonsági elemzés számára fontos a rengés maximális vízszintes gyorsulásának valószínűségi eloszlása, ez a veszélyeztetettségi görbe. Ez a valószínűségi módszerrel történő földrengésveszély-elemzés eredménye, amelyről leolvasható a  $10^{-4}$ /év meghaladási valószínűséghez tartozó maximális talajgyorsulás, illetve a helyi talajviszonyoknak megfelelő válaszspektrum. A valószínűségi módszer alkalmazása során természetesen fontos input adat az egyes szeizmikus forrásokban, területeken elképzelhető maximális magnitúdó is, de a helyi megrázottság nem egy konkrét helyen kipattanó, adott méretű rengés, hanem minden lehetséges rengés figyelembe vételével adódik.

Így történt a földrengésveszély, illetve a tízezer évenként előforduló legnagyobb megrázottság meghatározása a paksi telephelyre is.

Abból, hogy egy földrengés során milyen maximális vízszintes gyorsulás alakul ki, önmagában nem ítéltető meg az, hogy a létesítmények megsérülnek-e vagy sem. A kilences magnitúdójú Tohoku földrengés

## Richter-skála

A Richter-skála a földrengés erősségének műszeres megfigyelésen alapuló mérőszámát (a Richter-magnitúdót, vagy más szóval a méretet) adja meg. A magnitúdó a földrengéskor a fészekben felszabaduló energia logaritmusával arányos.

A Richter-magnitúdót eredetileg egy bizonyos típusú szeizmográf által jelzett legnagyobb kitérésből és az epicentrumtól való távolságából egy képlettel határozzák meg. (Maga az érték a földrengés helyétől 100 km távolságban lévő Wood-Anderson-típusú szeizmográf által mikrométerben mért legnagyobb kitérés tízes alapú logaritmus.) Ma már számos más magnitúdódefiníció létezik, amelyek között egy bizonyos földrengés méretét illetően némi eltérés is van.

Ebből értelemszerűen következik: a skála felfelé nyitott, vagyis nincs formális maximuma, bár a földrengések hatásmechanizmusa és a Föld szilárd kérgének mechanikai jellemzői alapján gyakorlatilag 10 feletti értékek nem fordulnak elő. Másik fontos jellemzője, hogy a skála két fokozata között a kipattanó energiában körülbelül 32-szeres különbség van.

által Hunshu-sziget partvidékén kiváltott átlagos vízszintes gyorsulás 0,3–0,35 g lehetett. Ez az érintett 14 blokk tervezési alapjában figyelembe vett biztonsági földrengésnél némileg nagyobb, bár pontos adatok még nem állnak rendelkezésre. A Niigataken Chuettsu-Oki földrengés csak 6,6–6,8 magnitúdójú volt, de a Kashiwazaki-Kariwa atomerőműnél mintegy 0,68 g maximális vízszintes gyorsulást okozott a reaktorépületek alaplemézén. Ez több mint kétszerese volt az ottani blokkok tervezési alapját képező rengés gyorsulásának. A fenti két esetben a talajmozgás által kiváltott igénybevételeket a nukleáris szabványok szerint tervezett berendezések és szerkezetek sérülés nélkül elviselték.

Kijelenthető, a rezgés jellegű hatásra való tervezés nem műszaki, hanem beruházási költség kérdése.

Nincsenek azonban megbízható műszaki megoldások az olyan esetekre, amikor a földrengés a felszínen is tapasztalható elvetődéshez, elcsúszáshoz vezet. Ez felveti a következő kérdést.

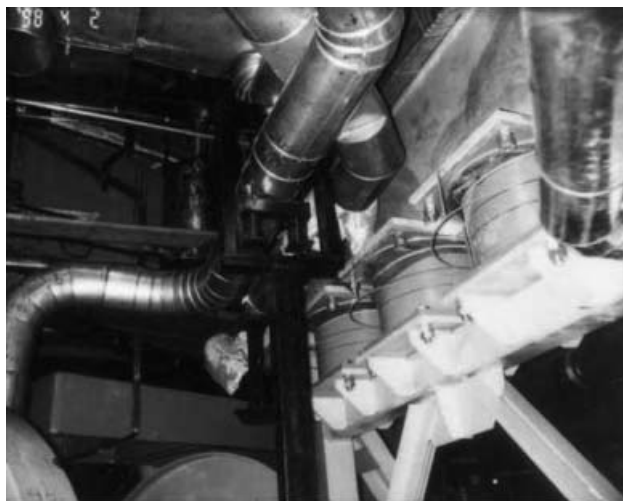
## Lehet-e törésvonal a telephely környezetében?

A fentiekből egyértelmű, hogy csak az olyan törésvonal jelent a telephely kiválasztásánál alkalmasságot kizáró körülményt, amely képes felszínre kifutó elvetődést okozni. A telephelyet nem szabad kijelölni az ilyen szerkezetek felett, a minimális távolságnak legalább 8–10 km-nek kell lennie. Az, hogy egy szerkezet képes-e felszínre kifutó elvetődést okozni az alacsony szeizmicitású területeken a földtörténeti negyedkor (körülbelül 2,5 millió év) alatti aktivitás alapján állapítható meg.

Felmerül a kérdés, hogy veszélyesek-e a paksi telephely közelében lévő törések. Minden aktív törésvonalra érvényes az, hogy talajmozgást okozhat a rajta kipattanó földrengés, de ezt figyelembe vettük az atomerőmű telephelyén várható megrázottság meghatározásánál, s az atomerőmű földrengés-biztonsági megerősítésénél. A Pannon-medence töredezett, de az adott földtani körülmények között általában nem tud akkora rugalmas energia felhalmozódni, hogy az a felszínen tapasztalható relatív elmozdulást okozzon, ha az egy földrengés formájában felszabadul. Ezért az ilyen törésvonalak, s a paksi telephely közelében lévők sem zárják ki a telephely alkalmasságát.

## A földrengés-biztonsági program

A paksi atomerőmű telephelyét a hatvanas években a történelmi feljegyzések és a műszeres mérések alapján az ország egyik legkisebb veszélyeztetettségű területén jelölték ki, és ennek alapján, illetve az 1970-es években érvényes földrengés-biztonsági követelmények figyelembe vételével tervezték és építették. A külső környezeti hatásokkal összefüggő biztonsági követelmények a nyolcvanas években radikálisan megváltoztak, szigorúbbak lettek. Ennek értelmében



1. ábra. Viszkózus lengéscsillapítók a gőzfejlesztők alatt.

a korábban, a történelmi feljegyzésekből és műszeres regisztrátumokból meghatározható legnagyobb földrengés-intenzitásból származtatott gyorsulásértéknél jóval kisebb valószínűségű,  $10^{-4}$ /év meghaladási valószínűséggel jellemezhető megrázottságot kell figyelembe venni a tervezés alapjaként. A probléma értékelését a paksi atomerőmű első korszerű módszerekkel végzett, szisztematikus biztonsági elemzése tartalmazta 1993-ban. A telephely szeizmicitásának előzetes értékelése és a biztonsági probléma elemzése alapján az atomerőmű vezetése – a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség szakértő támogatásával és az Országos Atomenergia Hivatal felügyelete mellett – egy átfogó biztonságnövelő projektet indított a létesítmény földrengésbiztonságának növelése céljából.

A követelmények értelmezése és teljesítése azt jelentette, hogy:

- a telephelyi földrengésveszély elemzését el kellett végezni, s meg kellett határozni a  $10^{-4}$ /év meghaladási valószínűségű, biztonsági földrengés jellemzőit. Ez a paksi telephely esetében 0,25 g maximális vízszintes gyorsulással jellemezhető;

- erre az új tervezési alapra el kellett végezni az atomerőmű ellenőrzését, majd a megerősítések tervezését;

- végre kellett hajtani az atomerőmű teljes körű minősítését/megerősítését úgy, hogy még a 10 000 évenként egyszer előforduló rengés esetén is leálljon a reaktor, lehűthető és tartósan hűthető maradjon, és az aktivitás visszatartása biztosított legyen.

A program két szakaszban valósult meg. A könnyen végrehajtható, legsürgősebb megerősítések még egy előzetes, felülbecsült földrengésinputra 1994–1995-ben megtörténtek. Ekkor a kábeltálcák, a villamos- és irányítástechnikai keretek, szekrények, az akkumulátortelepek rögzítésének ellenőrzése, illetve a főépület különböző helyiségeit elválasztó, nem szerkezeti válaszfalak állékonyságának ellenőrzése, illetve mindezek megerősítésének megtervezése és kivitelezése történt meg. A komoly előkészítést igénylő megerősítések tervezése és kivitelezése 1998-ban kezdődött és 2002 végéig befejeződött. Ennek jellemzésére elég egy számot



2. ábra. Hosszirányú megerősítések a reaktorcsarnokban.

ismertetni: több mint 2500 tonna acélszerkezetet építettek be az erőmű megerősítésére.

A feladat egyedülálló volt, hiszen lényegében egy földrengésre nem tervezett erőművet kellett egy jelentős megrázottságra megerősíteni és minősíteni. Ehhez a *Szerkezetek, rendszerek biztonsági és földrengésbiztonsági osztálya* szerint differenciáltak a dinamikai válasz és az igénybevételek számítási módszerét és a minősítési eljárást. Ehhez jöttek még az atomerőmű-tervezéshez előírt, szabványos módszerek, valamint az újraminősítéshez kidolgozott elemzési és empirikus minősítési módszertan. A módszertan kiválasztását kísérletekkel, próbaszámításokkal, numerikus kísérletekkel alapoztuk meg.

A program végén valószínűségi biztonsági elemzés igazolta, hogy az elvégzett intézkedések a biztonság „szükséges és elégséges” szintjét eredményezték. A 2007-ben elvégzett időszakos biztonsági felülvizsgálat pedig megerősítette, hogy a földrengésbiztonság megvalósítása megfelel az aktuális nemzeti és a nemzetközi normáknak.

Ez a projekt a paksi atomerőmű legnagyobb, másfél évtized alatt megvalósuló biztonságnövelő programja lett, amelynek csak a megerősítésekre fordított költsége több mint 200 millió USD-t tett ki.

Néhány megerősítésre mutatnak példát az 1–3. ábrák a gőzfejlesztők alatt, a reaktorcsarnokban és a lokalizációs tornyoknál.

A földrengésnek a talajmozgáson kívül lehetnek egyéb következményei is. Ilyen volt a szökőár Japánban. Erről a paksi és dunai körülmények között nincs

értelme beszélni. Van azonban más jelenség is, mint például a talajfolyósodás, ami abban nyilvánul meg, hogy a rezgés hatására a vízzel telített laza talajok elveszítik a nyírószilárdságukat, azaz folyadékszerűen viselkednek. Ez az alapozásnak, valamint az épület stabilitásának elvesztését, illetve a jelenség után az épület megsüllyedését okozza. A paksi atomerőmű esetében a talajfolyósodás tervezésen túli esemény, az előfordulás valószínűsége kisebb, mint  $10^{-4}$ /év.

## Mi történik az atomerőműben földrengés esetén?

A program keretében kidolgozták az üzemeltető személyzet számára azt az üzemzavar-elhárítási utasításrendszert, ami meghatározza a teendőket földrengés esetén. Az ilyen helyzet kezelése a személyzet rendszeres képzésének ugyanúgy része, mint bármely más rendkívüli eseményé. Földrengés esetén a paksi atomerőmű a védelmi működéseknek köszönhetően leáll, ha bármely rendszer sérül, de rendelkezésre állnak azok a megerősített technológiai rendszerek, amelyek segítségével az atomerőmű biztonságos állapotban tartható. Az ekkor szükséges technológiai műveleteket, a személyzet tevékenységét, illetve az atomerőmű föld-

3. ábra. Hídszerkezet a lokalizációs tornyok közötti reaktorcsarnok szerkezetének megerősítésére.



rengést követő állapotának értékelését speciális műszerezés, gyorsulásérzékelők segítik. A gyorsulásérzékelők csupán kiegészítő műszerezésnek tekinthetők, hiszen a blokkokat bonyolult idegrendszerként behálózzák a mérések és védelmek, amelyek a megfelelő védelmi működéseket indítják, ha bármely, a biztonság szempontjából fontos rendszer sérülne.

Földrengés esetén a talplemezen elhelyezett detektorok 0,05 g vízszintes irányú gyorsulásnál jelet adnak a vezénylőkbe, illetve indítják az izolálendő armatúrák zárását. Ez a védelmi működés még nem okozza a blokkok leállítását, de azokat a rendszereket kizárja, amelyek nem lettek földrengésállóvá téve, mert az adott esetben nincs biztonsági funkciójuk. A blokkot a minden biztonsági funkcióval rendelkező rendszer működőképességét felülegyelő mérés- és irányítás-technikai, illetve védelmi rendszerek leállítják, ha a funkció sérül. Így például a buborékoltató kondenzátorban egy földrengés hatására fellépő szintingadozás, vagy gőzfejlesztő szintingadozás is, ami mellett még semmilyen sérülésnek nem kell bekövetkeznie. Egy földrengés esetén a blokk így vagy leáll, vagy ha

nincs semmilyen zavar, illetve funkcióvesztés, tovább üzemel. Arról, hogy a blokkokat le kell-e állítani egy (kis) földrengés után, ha egyébként védelmi működés nem volt, a szabad felszínen (udvartéren) lévő gyorsulásérzékelő jelének feldolgozása alapján kell dönteni. Erre meghatározott eljárás és kritériumok vannak. Abban az esetben, ha a kritérium alapján vagy védelmi működés következtében a blokk leáll, az állapot függvényében kell az üzemzavar-elhárítást és az állapotellenőrző bejárásokat szervezni és végrehajtani. Az állapot értékeléséhez a blokkok kritikus helyein gyorsulásregisztrálók vannak. Ez a koncepció a világ más, szeizmikusan mérsékeltén aktív területein lévő atomerőművek eljárásával azonos.

A program megvalósításával párhuzamosan az atomerőműben és annak ötven kilométeres körzetében kiépült egy mikroszeizmikus megfigyelő hálózat, amely a telephely és lényegében az egész régió szeizmikus aktivitását monitorozza. Nem szabad azonban azt hinni, hogy a blokkokon lévő szeizmikus műszerezés, vagy akár a mikroszeizmikus hálózat arra szolgálhat, hogy azzal földrengéseket előre jelezzenek.

## NYÁRI ÉJSZAKÁK LÁTVÁNYOS LÉGKÖROPTIKAI JELENSÉGEI: AZ ÉJSZAKAI VILÁGÍTÓ FELHŐK

Farkas Alexandra

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

Az éjszakai égbolt látványosságai korántsem merülnek ki a csillagokban vagy a bolygókban. A kékes színű éjszakai világító felhők a nyári napforduló környékén látszanak, napnyugta után vagy napkelte előtt kereshetjük őket az északi horizont környezetében. A jelenség főként a 45–80° földrajzi szélességű régiók jellemző látványossága. A legtöbb és legfényesebb éjszakai világító felhő a 60° körüli földrajzi szélességek környezetében figyelhető meg, a közelmúlt óta azonban – eddig feltáratlan okok miatt – egyre gyakrabban érkezők észlelések alacsonyabb földrajzi szélességekről is. Június közepétől július végéig hazánkból is megfigyelhetők [1], így szerencsés esetben mi is tanúi lehetünk a szín pompás légköroptikai jelenségeknek.

### Vízjégkristályokból álló felhők a mezoszférában

Annak ellenére, hogy morfológiájuk alapján ugyanolyan felhőknek tűnnek, mint bármelyik hagyományos felhő, nem tévesztendő össze semmi mással. Ezek ugyanis nem a troposzférában, hanem még a

sztratoszféránál is magasabban, a *mezoszférában* (50–90 km között) alakulnak ki. A földfelszínről akkor válnak láthatóvá, ha a Nap a látóhatár alatt  $-6^\circ$  és  $-16^\circ$  között járva megvilágítja azokat.

Létrejöttük azért kötődik a nyári napforduló időszakához, mert a mezoszférában nem télen, hanem ebben az időszakban uralkodik a leghidegebb, 130 K alatti hőmérséklet, amely a jelenlévő rendkívül alacsony páratartalom mellett ideális a felhők kialakulásához. Fontos megjegyezni, hogy a mezoszféra hőmérsékletének változása a troposzférához képest fordított, azaz ha a troposzférában nő a hőmérséklet, akkor a mezoszférában csökken [2]. A felhők létrejöttéhez szükséges jégképző magokat és vízpárát a troposzférában gyakorlatilag korlátlan mennyiségben megtalálhatjuk, azonban a mezoszférában, Földünk egyik legkritikább és legszárazabb légköri rétegében külön meg kell vizsgálnunk lehetséges jelenlétüket és forrásaikat.

### Vízpára és jégképző magok

Az 1883-ban bekövetkező, rendkívül pusztító Krakatau-kitörés és az 1908-as Tunguz-esemény után észlelt éjszakai világító felhők kapcsán a víz természetes forrásként megemlíthetjük a ritkán előforduló nagyobb

A cikk a szerző azon dolgozatából készült, amivel I. díjat nyert 2010. december 9-én az ELTE Meteorológia TDK Konferenciáján.