

A petrinjai földrengéssorozat geológiai háttere és jellemzése

CZECZE BARBARA

2020. december 29-én délben szinte a teljes hazai lakosság különös dolgot tapasztalhatott. A szomszédos Horvátország területén kiptantant 6,2-es magnitúdóval egy igen nagy energiájú földrengés, melyet az ország bármely pontján érezhettek az olvasók valamilyen formában. A jelen tanulmány igyekszik összefoglalni ennek a rendkívüli eseménynek a mozgatórugóját, hogy minek is köszönhető egy ekkora földrengés a közvetlen szomszédságunkban, valamint bemutatja az utóregések főbb tulajdonságait. Az eset rávilágít arra, hogy hazánk igen változatos geodinamikai környezetben helyezkedik el, ahol a mai napig aktív lemezmozgások mennek végbe. A horvátországi események felhívták a lakosság figyelmét arra, hogy a térség aktív geológiai fejlődése okán bármikor előfordulhatnak nagyobb károkat okozó földrengések Magyarország területén is.

Bevezetés

2020. december 28-án egy erős földrengéssorozat vette kezdetét Horvátországban, Petrinja város közelében. Az első előregés 5,1-es magnitúdóval pattant ki, mely csak Közép-Horvátországban volt érezhető, majd 4,6-os, 3,8-as, és egyre gyengébb rengések követték.

A következő napon, december 29-én 12 óra 19 perckor egy szignifikánsan erősebb, 6,2-es magnitúdójú földrengés rázta meg a térséget, melyet már a környező országok – köztük Magyarország szinte teljes lakossága – is érzékelt. Így világossá vált, hogy az előző napok eseményei csak az előregések voltak. A földrengésben tragikus módon hét ember veszítette életét az összedőlő házaknak köszönhetően. Az alábbi összefoglalás egy kicsit részletesebben bemutatja az olvasónak a földrengéssorozat hátterét, és annak közvetlen hatásait.

Szeizmotektonikai háttér

Ahhoz, hogy megértsük a horvátországi események mozgatórugóját, mindenképp szükség van némi lemeztectonikai, geodinamikai áttekintésre, hiszen ezek az események egy igen bonyolult, hazánkat is érintő folyamat eredményei.

A Föld szilárd burkát (más néven litoszférát) kőzetlemezek építik fel, melyek egymáshoz képest folyamatos mozgásban vannak. A lemezek szegélyeik mentén összeütközhetnek, távolodhatnak egymástól, illetve egymás mellett is elcsúszhatnak. Ezen mozgások hatalmas mennyiségű energiát, feszültséget szabadítanak fel mozgásuk során, melynek számos jelét ismerhetjük. Az energia felszabadulhat hatalmas földrengések formájában, de gyúrt hegyvonulatok, széthúzásos medencék is születhetnek. Éppen ezért a kutatók jelentős energiát fordítanak a jelenkori feszültségterek vizsgálatára. Az ún. feszültségprovinciák nem csak a jelenlegi szerkezeteket tudják megmagyarázni, de a jövőben

várható eseményekről is képet adhatnak. A feszültségtér vizsgálata az elmúlt pár évtizedben egy nagyon jól fejlődő terület volt, így egyre jobban megismerhetjük a környezetünkben végbemenő folyamatokat.

Amikor két kőzetlemez ütközik egymással, akkor egész egyszerűen összenyomódik, térrövidülés (kompresszió) következik be, ha pedig távolodnak egymástól, akkor tágulást, széthúzást figyelhetünk meg, melyek mind nagyon egyedi és különleges felszínformákkal, geológiai- és geodinamikai folyamatokkal járnak, így a feszültségtér ismerete nagyon értékes számunkra. Különösen fontosak ezen tanulmányok a Pannon-medencében, ugyanis hazánk és a vizsgált terület ritka bonyolult felépítésű geodinamikai környezetben található, éppen ezért a medence kutatásában a külföldi kutatók is már hosszú évtizedek óta részt vesznek.

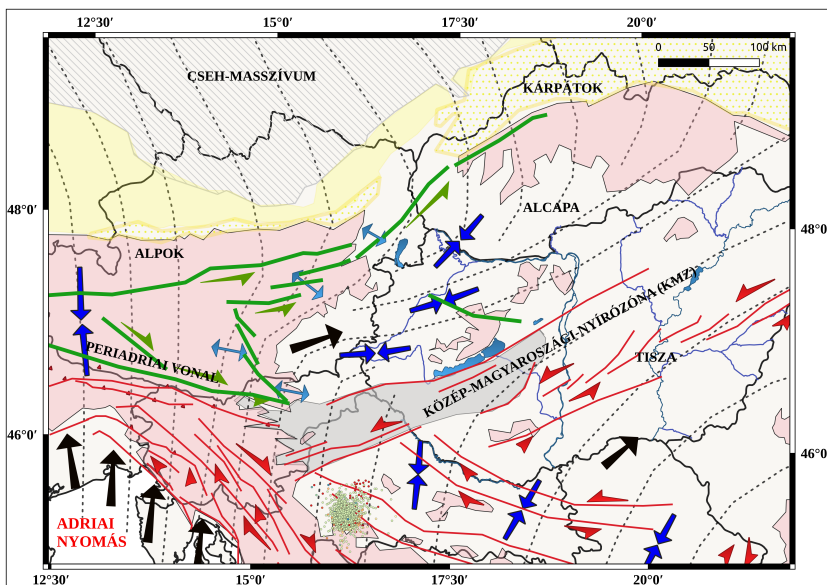
A feszültségtér vizsgálata alapján Európa két nagy területre osztható, ezek a Stabil- és Mobil-Európa. Nem meglepő, hogy a horvátországi események a Mobil-

Európai régióhoz tartoznak, így a mostani áttekintésben csak erről a területről esik szó. Ide tartozik az Alpok, a mediterrán régió (Égei-tenger és Nyugat-Anatólia, Appennin-félsziget), a Pireneusi-félsziget (1. ábra).

Ahhoz, hogy megértsük a jelenleg folyó geodinamikai folyamatokat, elengedhetetlen a nagyobb képet vizsgálva betekinteni a múltba. A hazánknak is bölcsőt adó Pannon-medence egy széthúzásos eredetű medence, mely valamikor 23 millió évvel ezelőtt kezdett kialakulni. Kialakulása több tényező együttes jelenlétének köszönhető, de nagy részben a Kárpátok külső keleti íve mentén végbemenő alábukásnak (ún. szubdukciónak). Az alábukó zóna folyamatos hátrálásának köszönhetően a medence aljzata északkeleti irányban elmozdult, miközben a 2. ábrán látható ALCAPA nevezetű egység az óramutató járásával ellentétesen, a Tisza-egység pedig azzal megegyező irányban forgott. Ekkor alakult ki a ma is aktívnak mondható törésvonal-rendszer ÉK-DNY irányban.



1. ábra. Áttekintő térkép a vizsgált területről, Mobil-Európáról. A piros kör jelzi a Petrinja földregéssorozat környezetét.



2. ábra. A térség fő szerkezeti egységei, valamint az Adriai mikrolemez lemeztektonikai hatásai (Horváth, 2004) – A szaggatott vonalak a jelenkori feszültségteret jelölik, vagyis a maximális horizontális feszültségek irányait (Bada et al, 2004).

Az ALCAPA mozgásának mozgatórugója délen az Adriai-mikrolemez óramutató járásával ellentétes mozgása, és folyamatos észak felé nyomulása okozza. A nagyobb fő kőzetlemezek egymáshoz való közeledése következtében az Adria, az Alpok, a Dinaridák térségében folyamatos összeütközés zajlik, ennek köszönhető az ALCAPA egység folyamatos kipurolódása. Miután a korábban említett alábukási zóna működése megállt, megszűnt a medence folyamatos tágulása, és az akkori széthúzó, tágulós feszültségteret kompressziósá vált, így ma főleg eltolódásos, vagy feltolódásos deformációkat figyelhetünk meg. Ma a Pannon-térséget igen változatos feszültségteret jellemzi. A Dinaridák, valamint az Alpok déli részénél aktív feltolódásos, illetve ún. transzpressziós deformációknak lehetünk szemtanúi. A tér viszont nem homogén, míg Zágráb környékén eltolódásokat láthatunk, addig a tengerparti területeken összenyomódás figyelhető meg. Dél fe-

lől a medence belseje felé haladva szintén változatos kép fogad minket – a tengerparti területekről északkelet felé haladva oldaleltolódások figyelhetők meg. Az Alpok keleti részén zajlik az Adria és Európa közötti összeütközés, de az Alpok keleti irányú kilökődésének is nagy szerepe van, így itt is szintén eltolódásos tér van jelen több nagyobb nyírásos zónával karöltve.

Horvátország, ami az Alpi-Mediterrán szeizmikus régió része, több geotektonikai egységből épül fel. A legfontosabbak északon a Pannon-medence (mely medencében található hazánk is), a Keleti-Alpok, a Dinaridák, a Dinári-Adriai platform átmeneti zóna és az Adriai platform önmagában. Horvátországban a szeizmicitás egyenlőtlenül oszlik el, a legtöbb földrengés a Dinaridákhoz kapcsolódik. A 2. ábrán a jelen tanulmányban bemutatott eseményeket színes pöttyök jelölik. Ezek a földrengések jól láthatóan két fő geológiai provincia között pattantak

ki, a Pannon-medence és a Dinaridák között. A Dinaridák egy széles, északnyugat-délkelet irányítottágú öv, mely Délnyugat-Szlovéniától Montenegróig húzódik Horvátország Adriai-tengerpartja mentén. Dióhéjban tehát, a jelenleg is zajló tektonikai folyamatok egyik mozgatórugója az Afrikai- és Európai-lemez közeledése miatt folyamatosan zajló kollózió az Adria és az Alpok-Dinaridák határzónájában, mely következménye az Alcapa-egység eredeti helyéről történő, keleti irányba való kitéréselődése.

A Pannon-medence legfőképpen lemezen belüli szeizmicitással jellemezhető, ahol nagyobb események ritkán ismétlődnek. Így nem meglepő, hogy a vizsgált térségben korábban is pattantak ki nagyobb események. Egyrészt, a jelen tanulmányban tárgyalt földrengéssorozat előtt 9 hónappal Zágrábban is egy helyi viszonylatban jelentősnek mondható eseményt tapasztalhattak meg a horvát lakosok. A főrengés 5,5-ös magnitúdóval pattant ki, melyet 4,9-es utórengés követte 2020. március 22-én. Másrészt, ha megfigyeljük az elmúlt két évszázad adatait, láthatjuk, hogy 1861. december 18-án ($M = 5,4$), 1883. február 11-én ($M = 5,1$), és 1909. október 8-án ($M = 5,7$) is nagy energiájú földrengések pattantak ki ebben a térségben. Geológiai időskálán ezen események ismétlődése gyakorinak mondható, és egyértelműen jelzi a területen végbemenő folyamatok aktivitását.

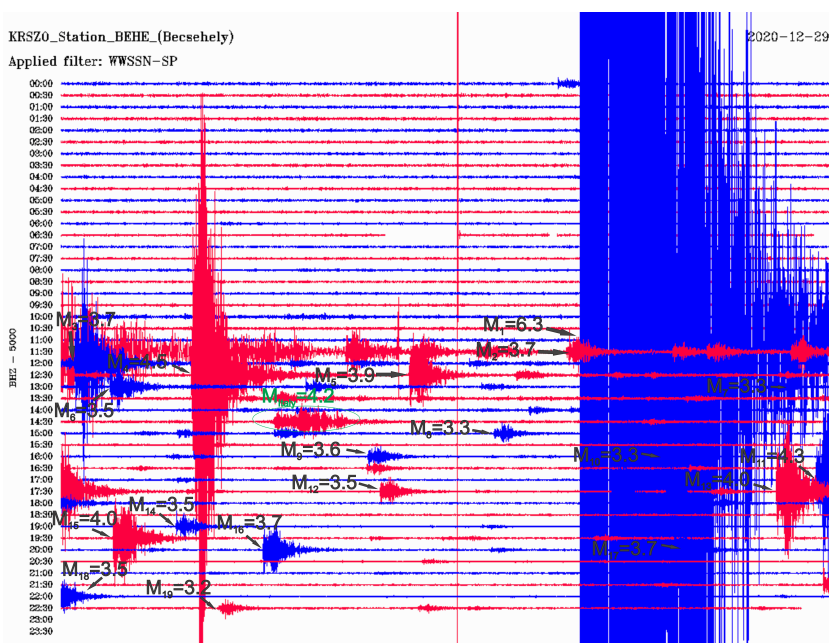
Utórengések

A főrengést rengeteg utórengés követte egy nagyon rövid időintervallumon belül. A kipattanás utáni 40 percen annyira sűrű jelek érkeztek a szeizmológiai állomásokra, hogy a jelek elkülönítése is nehézséget okozott.

A 3. ábrán a 2020. december 30-án regisztrált hullámformák látszódnak a becselhelyi szeizmológiai állomásunkon. Még szabad szemmel is rengeteg utórengés látható kevesebb, mint 24 óra leforgása alatt. Ezen regisztrátumokat tovább szűrve természetesen sokkal több utórengést rejt az ábra.

A szeizmológiában léteznek különböző fizikai törvények az utórengések számára és méretére vonatkozóan. Általában az utórengések száma nagyon gyorsan csökken, a kipattanás gyakorisága a főrengéstől számított idővel fordítottan arányos. Ez azt jelenti, hogy a főrengés másnapján máris csak feleannyi rengés várható, mint előző napon, de ennek ellenére még 2021 augusztusában is regisztráltunk utórengést. Észrevehető, hogy minél mélyebben van a főrengés hipocentruma, annál több utórengés detektálható. Természetes, hogy ezek az utórengések a főrengés közelében pattannak ki, és elegendően pontos helymeghatározással még az elvetődött kőzetblokkok törésvonalát is ki tudják rajzolni.

A horvát kutatók publikációi alapján 9350 db földrengés pattant ki 2020. december 28. és 2021. március 29. között. Ebből közel 6400 db földrengés helyét tudták nagy pontossággal meghatározni. Fontos megjegyezni, hogy a főrengés után a horvát szeizmológusok rengeteg ideiglenes állomást telepítettek a térségbe, így a legkisebb eseményeket is regisztrálni tudták. A legtöbb epicentrum egy nagyon keskeny területre koncentrálódik a már jól ismert ÉNY-DK irányú Petrinja-törés mentén. Az események egy kisebb csoportja a fő csapástól keletre koncentrálódik Petrinja és az attól 6 km-re keletre levő Mošćenica között, illetve egy harmadik kisebb fócsoport nyugatra, Velika Solina környékén is felismerhető. Az utórengésekre jellemző átlagos mélység mindössze 6-10 km közötti.



3. ábra. Becsehely szeizmológiai állomás regisztrátuma 2020. 12. 29-én. A hatalmas amplitúdóval megjelenő kék kilengés a főrengést jelöli, majd jól látható a rengeteg utórengés a főrengést követő órákban.

A Magyar Nemzeti Szeizmológiai Hálózat által detektált földrengések

A földrengéseket természetesen nem csak a lakosság érezte, hanem a műszereink is regisztrálták országszerte. A műszerek érzékenységének köszönhetően jóval a lakosság által érezhető szint alatt látjuk a kispattanó utórengéseket. A 3. ábra azt mutatja be, hogy a különböző szeizmológiai állomások egymáshoz képest mennyi fázist regisztráltak az utórengésekből a bulletinben publikált adatok alapján. Jól látszik, hogy a határmenti állomások (KOVH, MORH) tudták regisztrálni a legtöbb eseményt – szinte a zágrábi állomással meg egyező számban -, de szinte minden du-

nántúli állomás nagyon jól szerepelt.

Obszervatóriumunkban a rutinszerű helymeghatározásokhoz az általunk kimért fázisok első beérkezési idejét használjuk fel. Természetes, hogy minél több ilyen fázis (azaz állomás) a rendelkezésünkre áll, annál pontosabbak lehetünk a földrengés helyét illetően. Éppen ezért a horvátországi adatok az elsődlegesek az ideiglenesen telepített megannyi állomás következtében, de ezen adatokhoz nem férünk hozzá a helymeghatározásunk pillanatában. Összességében viszont elmondható, hogy az utórengések jelentős részét regisztráltuk. Mivel a szeizmológia nem ismer országhatárokat, ezért az adataink nyilvánosak, így a horvátországi kutatók felhasználhatják a kiméréseinket, mely lehetőséget ad a klaszter pontosabb analízisére.

Dátum	Magnitúdó	Mélység
2020. december 29.	4,4	10 km
2020. december 30.	4,8	10 km
2020. december 30.	4,7	10 km
2020. december 31.	3,7	10 km
2021. január 2.	3,4	9,3 km
2021. január 4.	4,4	10 km
2021. január 5.	3,3	10 km
2021. január 6.	4,9	10 km
2021. január 7.	4,0	9,9 km
2021. január 9.	4,8	8,7 km
2021. január 10.	3,8	9,6 km
2021. január 15.	4,4	10 km
2021. február 24.	3,9	10 km
2021. március 3.	4,2	10,9 km
2021. április 6.	4,6	10 km
2021. augusztus 1.	4,1	10 km
2021. augusztus 16.	4,6	10 km

1. táblázat. A petrinjai földrengéssorozat legnagyobb energiájú utóregései 2020. december 29. és 2021. augusztus 16. között a Horvát Szeizmológiai Szolgálat adatai alapján

Az események fészekmechanizmusa

A földrengés kipattanásának az okát a földtudományok már nagyon jól tudják vizsgálni. A földrengések túlnyomó többsége lemeztektónikai eredetű, vagyis a földrengést kiváltó, felhalmozódó feszültség a földkéregben gyűlt össze. A feszültség folyamatos felhalmozódása következtében a kőzettömb eltörik, majd vetősík, törésvonal mentén két szomszédos kőzetblokk egymáshoz képest elmozdul.

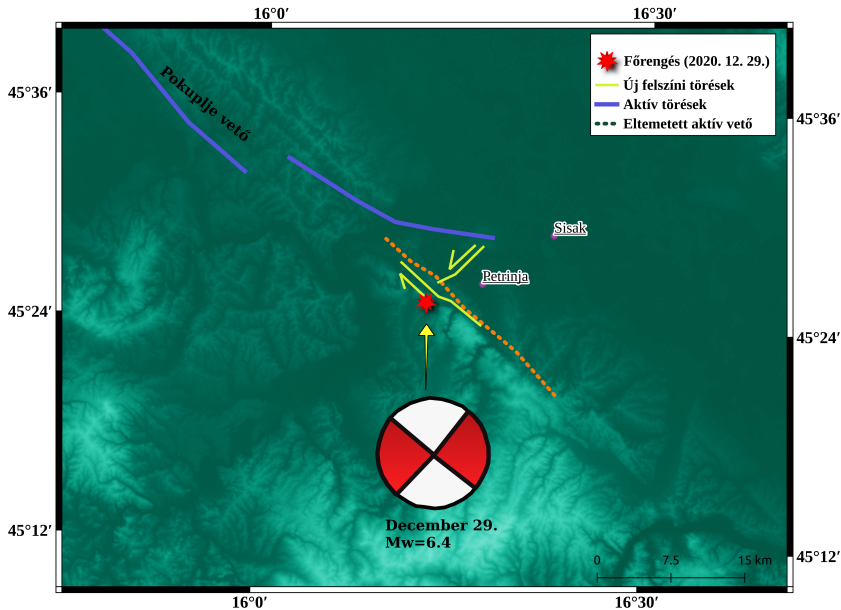
Ezek az elmozdulások többféleképpen lehetnek attól függően, hogy a kőzetlemezek hogyan mozdultak el horizontális, illetve vertikális irányban. Megkülönböztetünk egyszerű oldaleltolódást, normál vetőt, feltolódást egyaránt.

A földrengés fészekmechanizmusa tulajdonképpen azt árulja el, hogy ezek a kőzetblokkok egymáshoz képest hogyan mozdultak el a hipocentrumban, hogyan helyezkedik el a vetősík, merre történt el-

mozdulás.

A szeizmológiában egy ún. strandlabda szemlélteti a földrengéshez tartozó fészekmechanizmust. A hipocentrum köré rajzolt fokális gömböt két sík – a vetősík maga, és az erre merőleges segédsík (mely geológiai értelemmel nem rendelkezik) – négy negyedre osztja. A négy térfelületen felváltva tágulást és összehúzódást figyelhetünk meg. Ezek a térfelületek ideális esetben az műszereink regisztrátumaiban megjelenő hullámforma első beérkezésének iránya (polaritása) alapján ismerhető meg, de más módszerek is rendelkezésünkre állnak. A földrengés hipocentrumából kiinduló földrengéshullámok amplitúdója függ attól, hogy a hullám által megtett út hol metszi ezt a fokális gömböt. A különböző térfelületekben a szeizmológiai állomásokra beérkező elsődleges primer hullám elmozdulása pozitív, máshol negatív. A fokális gömb vetületét ábrázolva különböző színekkel jelöljük a negatív és pozitív amplitúdóval történő beérkezéseket.

A szeizmológia az ilyen strandlab-



5. ábra. A főregés közvetlen környezetének aktuális földtani képe – A kék vonalak a jelenleg is aktív töréseket jelölik, a szaggatott vonal egy eltemetett, de aktív törést mutat (Tondi et al, 2021). A főregés piros csillag formájában jelenik meg a hozzá tartozó fészekmechanizmus megoldással. A földrengések fészekparamétereinek forrása az ISC (International Seismological Center) nyilvános, még nem ellenőrzött adatbázisa.

dák (5. ábra) segítségével világított rá arra, hogy a kéregben kipattanó földrengések különböző típusú vetődéseket produkálnak, így oldaleltolódásos, normál vetős, feltolódásos régiók ismerhetők fel.

A Petrinja földrengéssorozat főregésének a fészekmechanizmusa megoldása szerint ebben az esetben egy függőleges törés menti jobbos oldaleltolódás történt az ÉNY-DK vető felszínén.

Ez azt jelenti, hogy a délnyugati vetőszárny elcsúszott északnyugat felé, az északkeleti pedig délkelet felé. Ez a fészekmechanizmus megoldás jó egyezést mutat a nemzetközi szeizmológiai központok megoldásaival, valamint a földrengéssorozat térbeli eloszlásával (Stipčević et al. 2021).

A 10 legerősebb, $M > 4,2$ földrengés fészekmechanizmusai függőleges törés menti horizontális elmozdulások, főleg a legerősebb utóregés és előregés esetén. Viszont van három olyan esemény, mely eltérő mechanizmust, úgynevezett fordított töréseket mutatnak.

Összességében tehát az eddig publikált 25 db földrengés fészekmechanizmusa legtöbb esetben oldalelmozdulás, mely jól korrelál a térségről elérhető információkkal, de a földrengéssorozat fő csoportján kívül ezek eltérőek lehetnek. A fészekmechanizmusból meghatározható a legnagyobb nyomás iránya a feszültségtérben, ezen megoldások alapján a föld kérgének DDNY-ÉÉK irányú összenyomódása, kompressziója történik.

Összefoglalás

Bár Magyarországot, és annak környezetét nyugodt területként tartjuk számon, a petrinjai földrengéssorozat felhívta a figyelmünket arra, hogy ez a térség is érintett lehet a nagyobb energiájú földrengések által. A földrengést szinte a teljes hazai lakosság érezhette, és a délnyugati megyékben károk is keletkeztek. Ez felhívta a figyelmünket arra, hogy az országunk földrengésveszélyeztetettsége valós. A fenti geodinamikai ábrán jól látszik a terület összetettsége, aktivitása, ezért érdemes szem előtt tartani, hogy térségünkben bárhol, bármikor előfordulhat földrengés, mely akár súlyos következményekkel is járhat.

A térségünk aktív geológiai, tektonikai fejlődése jelenleg is zajlik, geológiai időskálán vizsgálva igen változatos képet láthatunk. Magyarország az igen aktív mediterrán térség, és a stabil Kelet-Európai platform között helyezkedik el. Felhasználva az eddigi ismert történelmi földrengéseket, levonhatjuk azt a következtetést, hogy $M = 5,0$ magnitúdónál nagyobb földrengések átlagosan 40–50 évente fordulnak elő Magyarországon területén.

Irodalomjegyzék

- Bada G, Windhoffer G, Szafián P, Dövényi P (2004): Feszültségtér Európában és a Pannon-medence térségében: adatok, modellek és geodinamikai alkalmazások. ELTE Geofizika Tsz.
- Bada, G., Cloetingh, S., Gerner, P. és Horváth, F., 1998. Sources of recent tectonic stress in the Pannonian region: inferences from finite element modelling. *Geophys. J. Int.*, 134: 87-101.
- Bada, G., Horváth, F., Fejes, I. és Gerner, P., 1999. Review of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: progress and problems. *J. Geodynamics*, 27: 501-527.
- Bada, G., Horváth, F., Cloetingh, S., Coblenz, D.D. és Tóth, T., 2001. The role of topography induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. *Tectonics*, 20: 343-363.
- Bada, G. és Horváth, F., 2001. On the structure and tectonic evolution of the Pannonian basin and surrounding orogens. *Acta Geol. Hung.*, 44: 301-327.
- Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Stipčević, J. (2021): Niz potresa na Baniji, *Vijesti Hrvatskog geološkog društva*, 57/2, 4–7.
- Horváth F (2004): A Pannon-medence jelenkori geodinamikájának atlasza
- Horváth, F., Cloetingh, S., (1996): Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 266: 287-300.
- Josip Stipčević*, Iva Dasović*, Davorka Herak*, Marijan Herak*, Helena Latečki*, Marin Sečanj* and Bruno Tomljenović - The great Petrinja earthquake – a year after /<https://www.chem.pmf.hr/>
- International Seismological Centre (2020), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- The European-Mediterranean Seismological Centre (2021): M6.4 CROATIA on December 29th 2020 at 11:19 UTC, Special report, <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/264/M6-4-CROATIA-on-December-29th-2020-at-11-19-UTC>. [4. ožujka 2021.]
- Tondi, E., Blumetti, A.M., Čičak, M. et al. 'Conjugate' coseismic surface faulting related with the 29 December 2020, Mw 6.4, Petrinja earthquake (Sisak-Moslavina, Croatia). *Sci Rep* 11, 9150 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88378-2>
- Az ábrák a feltüntetett adatforrások alapján a QGIS szoftverrel készültek (QGIS v. 3.10.2 (<https://qgis.org/>))