

SCURT ISTORIC AL DEDUCERII RELAȚIILOR ACTUALE DINTRE ENERGIA SEISMICĂ ȘI MAGNITUDINE

Mirela-Adriana ANGHELACHE¹

mirelaadrianaa@yahoo.com

ABSTRACT: This paper aims to further develop issues related to magnitude, as a measure of earthquake strength, focusing on the relationship between magnitude and seismic energy. It also presents a brief history of the scientific activity of personalities who analysed seismic energy vs. magnitude and provided certain numerical calculations of them. They also established well-known magnitude scales: Richter and the seismic moment.

KEYWORDS: seismic energy, E_s , magnitude, Gutenberg-Richter energy-magnitude relationship, magnitude scales, Charles Richter, Beno Gutenberg, Hiroo Kanamori

Energia degajată de cutremur și magnitudinea, estimări

Energia potențială este stocată în crustă sub forma unui stres acumulat. În timpul unui cutremur aceasta energie depozitată este eliberată și determină fomarea de crăpături sau deformări în roci, degajare de căldură și energie seismică radiată E_s .

Între magnitudine și eliberarea de energie de către cutremure există o relație de proporționalitate directă, exprimată prin relații empirice (a se vedea NMSOP²-2, Bormann, 2012) [3]. Cu toate acestea, energia seismică nu poate fi calculată în mod corect din magnitudine fără a se ști scăderea de stres. Este posibil ca la seismogramele în bandă largă să se calculeze în mod direct energia E_s prin integrarea amplitudinilor vitezelor pătrate

¹ Cercetător științific la Institutul de Geodinamică „Sabba S. Ștefănescu” al Academiei Române; membru titular al Diviziei de Istoria Științei a CRIFST al Academiei Române.

² New Manual of Seismological Observatory Practice – noul manual al practicii observațiilor seismologice

ale undelor seismice pe intervalul duratei trenului de unde P și corectată pentru împrăștierea geometrică, atenuare și radiația sursei.

Momentul seismic, M_0 , poate fi o măsură a cantității totale de energie seismică care este transformată în timpul unui cutremur. Însă doar o parte din momentul seismic este convertit în energie seismică radiată, aceasta din urmă fiind cea înregistrată de un seismograf.

Amintim că:

$M_0 = \mu^3 A D$, unde μ este modulul de forfecare, A aria și D deplasarea medie în timpul rupturii.

În lucrarea din 1995 [5], Choy și Boatwright au decis că: „pentru coerența cu acele calculele istorice, precum și cu alte tipuri de magnitudine care au fost derivate din formula Gutenberg-Richter, păstrăm constantele originale”⁴.

Relația $\log_{10} E_s = 1,5M_s + 4,8$, (1), relație energie-magnitudine „Gutenberg-Richter”, este folosită în calcularea E_s .

Folosindu-se de estimarea $E_s = M_0 \times 10^{-4,8} = M_0 \times 1,6 \times 10^{-5}$, Choy și Boatwright (1995) au definit magnitudinea energiei, M_e , ca:

$$M_e = (2/3) \times \log_{10}(E_s) - 2,9, \quad (2)$$

unde E_s este energia seismică în (J) și constanta 2,9 este setată astfel încât M_e este M_w pentru condițiile de stres mediu. M_w este simbolul pentru magnitudinea din moment, iar subscriptul „w” denotă lucrul mecanic⁵ efectuat.

Totuși, această ecuație tot are problema rotunjirii constantei care ar trebui să fie 2,9333... în loc de 2,9, după formula originală publicată de Hanks și Kanamori (1979) [6]. Acest lucru poate fi evitat prin intermediul regresiei asupra datelor reale în expresia lui Choy și Boatwright (1995), $\log_{10} E_s = 1,5M_s + 4,4$, înlocuind M_s , magnitudinea undelor de suprafață, prin M_e și rezolvând-o pentru aceasta din urmă.

$$\text{Aceasta duce la relația: } M_e = (2/3)(\log_{10} E_s - 4,4) = (\log_{10} E_s - 4,4)/1,5, \quad (3)$$

Ecuția (3) este echivalentă cu ecuația pentru M_w (propusă mai întâi de Bormann et al. 2002) [2]:

³ μ = modul de forfecare = 32 GPa în crustă, 75 GPa în manta

⁴ “For consistency with historical computations as well as with other types of magnitude that have been derived from the Gutenberg-Richter formula, we retain the original constants”.

⁵ *mechanical work*

$M_w = (\log_{10} M_0 - 9,1)/1,5$, (4), care acum este acceptată ca standard și la NEIC/USGS.

Calculul magnitudinii energiei seismice, M_s , nu se face încă în orice procedură standard și, în mod curent, este realizat numai de către NEIC/USGS⁶ pentru evenimentele seismice selectate mai mari. De asemenea, este încă foarte dificil să se măsoare în mod fiabil E_s pentru cutremure moderate până la cutremure slabe, de la nivel local și regional.

Hiroo Kanamori [7] demonstrează relația dintre momentul seismic M_0 și energia seismică E_s astfel:

Se presupune că în timpul unui cutremur stresul pe planul de falie scade de la σ_0 la σ_1 . Atunci, la rândul ei, energia deformării scade, fiind definită de relația $\Delta W = \sigma DS$ unde $\sigma = (\sigma_0 + \sigma_1)/2$ este stresul mediu, D este deplasarea medie a planului de falie, și S este aria planului de falie. Combinând această expresie cu aceea pentru momentul seismic M_0 , se obține $\Delta W = (\sigma/\mu)M_0$, unde μ este rigiditatea medie a mediului în zona sursă.

Dacă se presupune că mișcarea faliei se oprește atunci când stresul de pe falie devine aproximativ egal cu stresul de frecare σ_f , $\sigma_1 = \sigma_f$, ecuația de mai sus se reduce la: $\Delta W - \sigma_f DS = (\Delta\sigma/2\mu)M_0$, unde $\Delta\sigma$ este scăderea de stres, $\sigma_0 - \sigma_1$. Deoarece $\sigma_f DS$ este pierderea de căldură în timpul falierii, partea din stânga ecuației reflectă energia totală de deformare minus pierderea de căldură. De aceea $(\Delta\sigma/2\mu)M_0$ poate fi considerată ca energia disponibilă pentru generarea undelor seismice. Scăderea de stres $\Delta\sigma$ este aproape constantă pentru cutremurele puternice și $(\Delta\sigma/2\mu)$ este aproximativ $1/(2 \times 10^4)$. Prin urmare, $M_0/(2 \times 10^4)$ dă o estimare a energiei seismice E_s .

M_e și M_w , utilitate

În timp ce M_w este cea mai potrivită magnitudine pentru estimarea dimensiunii⁷ cutremurului și, prin urmare, potențialului de hazard de tsunami reprezentat de cutremurele puternice și majore submarine, M_e este folosită pentru evaluarea hazardului de distrugerii cauzate de mișcarea puternică a terenului.

De aceea, ori de câte ori este posibil, aceste două magnitudini trebuie să fie determinate independent, dar luate în considerare împreună.

⁶ Centrul Național de Informare Cutremure (National Earthquake Information Center)/ Serviciul de Prospectare Geologică a Statelor Unite (United States Geological Survey)

⁷ produsul dintre aria zonei de rupere și deplasarea medie

Doar M_w este folosită ca o magnitudine unificată în multe aplicații seismologice (ShakeMap, studii de hazard seismic etc.), deoarece procedurile de calcul sunt bine dezvoltate și considerate stabile cu o incertitudine scăzută.

În niciun eveniment seismic nu trebuie derivate relații între M_w și M_c , dar având în vedere aplicațiile practice din cadrul avertizării timpurii și/sau evaluările mult mai realiste ale riscului seismic aproape în timp real, este recomandat să se ia în considerare raportul energie-magnitudine, respectiv diferența $M_c - M_w$ corespunzătoare, așa cum este determinată cu rutinele curente în ciuda neajunsurilor lor sau a problemelor încă disputate în ceea ce privește atât definirea magnitudinilor cât și practicile de măsurare ale lor. Fără îndoială, acestea permit estimari rapide nerafinale ale eficienței unui cutremur de a radia energia undelor seismice.

Scări de magnitudine, autori

Deoarece scările de magnitudine au fost folosite de aproximativ 40 de ani nu numai de către seismologi dar și de media, este mult mai convenabil să se exprime mărimea unui cutremur în termeni ai scării magnitudinii folosind relația energie-magnitudine:

$\log_{10} E_s = 1,5M_s + 11,8$, (5) [8] (relația Gutenberg-Richter, 1958), unde E_s este dată în ergi, $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ Joule}$, iar M_s este magnitudinea undelor de suprafață.

În același ordin de mărime poate fi scrisă și ecuația:

$M_w = \log_{10} M_0 / 1,5 - 10,7$ (M_0 în dyne cm), (6), care definește magnitudinea de moment și a cărei scară este folosită recent pentru exprimarea mărimii unui cutremur.

Constantele din ecuația (6) sunt în așa fel alese pentru a corespunde valorilor magnitudinilor din scările cele mai vechi, în general scării momentului local (sau „Richter”).

Pe scara Richter, o creștere cu o unitate pe scara logaritmică corespunde la $10^{1,5} = 31,6$ de ori creștere în cantitatea de energie eliberată, iar o creștere de 2 unități corespunde la 1000 de ori creștere în energie seismică.

Câteva rânduri despre cum a apărut scara Richter și autorii ei:

Charles F. Richter⁸, pe numele lui întreg Charles Francis Richter, (născut pe 26 aprilie 1900, lângă Hamilton, Ohio, SUA – decedat pe 30

⁸ Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. „Charles F. Richter.” Encyclopedia Britannica, Invalid Date. <https://www.britannica.com/biography/Charles-F-Richter>.

septembrie 1985, Pasadena, California), este fizicianul și seismologul american care a dezvoltat scara Richter pentru măsurarea magnitudinii unui cutremur.

Născut într-o fermă din Ohio, Richter s-a mutat împreună cu mama sa în Los Angeles în 1916. A frecventat cursurile Universității din California de Sud (1916–1917), apoi a studiat fizica la Universitatea Stanford (absolvită în 1920) și la Institutul de Tehnologie din California (Ph.D., 1928). Richter a făcut parte din echipa Laboratorului Seismologic al Institutului Carnegie din Washington, Pasadena, California (1927–1936), apoi a predat fizică și seismologie la Caltech (1937–1970) și a lucrat la Laboratorul Seismologic, fondat în 1936. Împreună cu Beno Gutenberg (1889–1960), profesor de origine germană la Caltech, Richer a dezvoltat în 1935 scara de magnitudine care a fost asociată cu numele său.

Pe baza înregistrării instrumentale a mișcării terenului, a elaborat o măsurătoare cantitativă a mărimii unui cutremur, complementară scării Mercalli, mai vechi, care se baza pe intensitatea raportată a unui cutremur. De asemenea, Richter a cartografiat zonele predispușe la cutremur în Statele Unite, deși a discreditat încercările de predicție ale cutremurilor.

A scris împreună cu Beno Gutenberg *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*⁹ (1949) și *Elementary Seismology*¹⁰ (1958). De asemenea, a scris articolul „Cutremure” pentru cea de-a 15-a ediție a *Encyclopædia Britannica* (publicată pentru prima dată în 1974).

Beno Gutenberg¹¹ (născut pe 4 iunie 1889, în Darmstadt, Germania – decedat pe 25 ianuarie 1960, în Los Angeles, California, SUA) este un seismolog american cunoscut pentru analizele sale asupra undelor seismice și informațiile care au contribuit la descifrarea proprietăților fizice ale interiorului globului terestru.

Gutenberg a fost profesor de geofizică și director al laboratorului de seismologie la Institutul de tehnologie din California, Pasadena, din 1930 până în anul 1957 când s-a pensionat. Colaborator al lui Charles Richter, împreună au pus la punct relația dintre magnitudine și energia seismică așa cum am menționat anterior, iar altă contribuție majoră a lor în seismologie este legea Gutenberg-Richter care estimează distribuția probabilității

⁹ *Seismicitatea pământului și fenomenele asociate*

¹⁰ *Seismologia elementară*

¹¹ Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. „Beno Gutenberg.” *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date. <https://www.britannica.com/biography/Beno-Gutenberg>.

cutremurelor pentru o anumită energie¹². De asemenea, calculând energia seismică eliberată de cutremurele de suprafață actuale, din lume, au arătat că trei sferturi din această energie este eliberată în Cercul de foc al Pacificului.

Gutenberg a scris mai multe cărți, dintre care amintim *Earthquakes in North America*¹³ (1950); a editat *Internal Constitution of the Earth*¹⁴ (1939) și împreună cu Richter a scris *The Seismicity of the Earth*¹⁵ (1941).

Magnitudinea din moment, dezvoltată de Kanamori (1977) [7], Hanks și Kanamori (1979) [6], este definită ținând cont de recomandările IASPEI pentru forma standard:

$$M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6,07, \quad (7)$$

unde momentul seismic este măsurat în Nm (NMSOP).

Cele două relații, (6) și (7), ale magnitudinii din moment (estimată în unități diferite), sunt echivalente.

Scara pentru M_w nu saturează și este o scară a magnitudinii mult mai adecvată pentru cutremurele mari [7].

Hiroo Kanamori¹⁶ (născut pe 17 oct. 1936) este un seismolog japonez care si-a adus contribuții fundamentale la înțelegerea fizicii cutremurelor și a proceselor tectonice care le provoacă. Împreună cu seismologul american Thomas C. Hanks, Kanamori a dezvoltat scara magnitudinii din moment care a înlocuit-o pe cea a lui Richer ca modalitate de măsurare a mărimii relative a unui cutremur. În această scară el a abandonat utilizarea amplitudinilor de undă de vârf în calculele sale, concentrându-se în schimb pe calcularea momentului seismic al unui cutremur (M_0) – adică deplasarea faliei pe întreaga sa suprafață înmulțită cu forța utilizată pentru a mișca falia.

Calcululele magnitudinii momentului continuă să exprime magnitudinea cutremurului utilizând o scară logaritmică, ceea ce permite ca rezultatele sale să fie comparate favorabil cu cele ale altor scări, sub magnitudinea 8¹⁷.

Kanamori a inventat metoda de calculare a distribuției alunecării pe

¹² https://en.wikipedia.org/wiki/Beno_Gutenberg

¹³ *Cutremurele din America de Nord*

¹⁴ *Constituția internă a Pământului*

¹⁵ *Seismicitatea Pământului*

¹⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Hiroo_Kanamori

¹⁷ Rafferty, J. P.. „Richter scale.” *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date. <https://www.britannica.com/science/Richter-scale>.

planul de falie prin forma de undă teleseismică cu Masayuki Kikuchi¹⁸. În plus, au studiat seismologia în timp real. În anul 2007 lui Kanamori i-a fost decernat Kyoto Prize¹⁹ în *Basic Sciences*²⁰.

Kanamori a dezvoltat și o metodă nouă pentru avertizările timpurii de cutremur, prin analiza rapidă a undei P printr-o rețea robustă. Algoritmul său este în mod curent testat cu rețeaua seismică din California de Sud „ShakeAlert”, sistemul de avertizare timpurie a cutremurelor, și este unul dintre cei trei algoritmi utilizați de sistem.

Caracteristicile scărilor de magnitudine

Fenomenul de saturare a magnitudinii se referă la tendința valorilor calculate ale magnitudinii cutremurelor să se grupeze în jurul unor praguri numerice sau scări logaritmice și acest lucru se întâmplă de obicei atunci când măsurătorile magnitudinii cutremurelor se bazează pe amplitudinea de vârf a celor mai mari unde seismice ale unui eveniment seismic dat.

De exemplu, pentru magnitudinile cutremurelor măsurate folosind scara originală Richter, cele ale căror magnitudine depășește 6,5 sunt caracterizate în mod greșit cutremure de 6,5. Din cauza limitărilor impuse de seismografe și de necesitatea de a măsura o singură amplitudine de vârf, această scară subestimează energia eliberată de cutremurele cu magnitudine mai mare de 6,5, deoarece valorile calculate după măsurarea undelor seismice foarte mari tind să se grupeze, sau „satureze”, aproape una după alta.²¹ De asemenea, fenomenul de saturare a magnitudinii apare când se calculează magnitudinea undelor de volum (m_b)²² și magnitudinea undelor de suprafață (M_s) pentru cutremurele ale căror magnitudini se apropie sau depășesc 8.

Saturarea magnitudinii a fost motivul pentru care cutremurul din Chile, din 1960, a fost mai întâi estimat a avea magnitudinea 8,3 pe scara magnitudinilor undelor de suprafață, iar apoi la recalculare, câțiva ani mai târziu, a fost estimat a avea magnitudinea 9,5 (cf. Kanamori, 1977 [7]), cea mai mare magnitudine din moment, M_w , atinsă până acum de un cutremur.

¹⁸ Seismolog japonez,, faimos pentru seismologia în timp real.

¹⁹ Premiul Kyoto

²⁰ *Științe Fundamentale*

²¹ Rafferty, J. P.. „Richter scale.” Encyclopedia Britannica, Invalid Date. <https://www.britannica.com/science/Richter-scale>.

²² prescurtare de la *body-wave magnitude*

Pentru cutremurele mari, agențiile guvernamentale de monitorizare a cutremurelor, cum sunt de exemplu, USGS și JMA²³, pun destul de des la dispoziția publicului magnitudinea inițială a cutremurelor folosind mai întâi scările magnitudinilor undelor de volum și de suprafață.

Calculul magnitudinii cutremurelor folosind aceste metode este mai puțin complicat decât determinarea magnitudinii din moment și permite acestor agenții să raporteze mărimea relativă a unui cutremur foarte rapid. În funcție de timp și resurse, magnitudinile cutremurelor sunt modificate ulterior folosind scara magnitudinii din moment²⁴.

Bibliografie:

- [1] Bath, M. (1983). *Introduction in Seismology*. Birkhäuser Verlag, Basel and Stuttgart, 395 pp.
- [2] Bormann, P., M. Baumbach, M. Bock, H. Grosser, G. L. Choy, and J. Boatwright J (2002). *Seismic sources and source parameters*, in: Bormann, P. (ed), *IASPEI New Manual Seismological Observatory Practice*, GeoForschungsZentrum Potsdam, Vol. 1, Chapter 3, 94 pp.
- [3] Bormann, P. (Ed.) (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI. <https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2>.
- [4] Bormann Peter, Giacomo Domenico (2010). *The moment magnitude and the energy magnitude: common roots and differences*. *Journal of Seismology*, Springer Verlag, 2010, 15 (2), pp. 411–427. [ff10.1007/s10950-010-9219-2](https://doi.org/10.1007/s10950-010-9219-2). [ffhal-00646919f](https://doi.org/10.1007/s10950-010-9219-2).
- [5] Choy, G. L., and J. Boatwright (1995). *Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress*. *J. Geophys. Res.* 100, 18, 205–18, 228.
- [6] Hanks, T. C. and H. Kanamori (1979). *A moment magnitude scale*. *J. Geophys. Res.* 84, 5, 2348–2340.
- [7] Kanamori, H.(1977). *The energy release in great earthquakes*, *J. Geophys. Res.* 82, 2981–2987.
- [8] Richter, C. (1958). *Elementary seismology*. W.H. Freeman Comapany, San Francisco and London, 768 pp.

²³ Japan Meteorological Agency (Agenția Japoneză de Meteorologie)

²⁴ Rafferty, John P. „Moment magnitude”. *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date, <https://www.britannica.com/science/moment-magnitude>. Accessed 7 April 2021.

Surse internet:

- [9] ***, Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. „Charles F. Richter.” *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date. <https://www.britannica.com/biography/Charles-F-Richter>.
- [10] ***, Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. „Beno Gutenberg.” *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date. <https://www.britannica.com/biography/Beno-Gutenberg>.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Beno_Gutenberg.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Hiroo_Kanamori.
- [13] ***, Rafferty, J. P.. „Richter scale.” *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date. <https://www.britannica.com/science/Richter-scale>.
- [14] ***, Rafferty, J. P.. „Richter scale.” *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date. <https://www.britannica.com/science/Richter-scale>.
- [15] ***, Rafferty, John P.. „Moment magnitude”. *Encyclopedia Britannica*, Invalid Date, <https://www.britannica.com/science/moment-magnitude>. Accessed 7 April 2021.