

آشوب: مانع اساسی پیش بینی تعیینی زمین لرزه

نوشته: مهندس علی اکبر اسلامی *

چکیده

روش های گوناگونی در درازنای تاریخ برای پیش بینی (Prediction) زمین لرزه به کار گرفته شده که همه آنها ناموفق بوده اند. در پژوهش های جدید، عدم توفیق در پیش بینی تعیینی (deterministic prediction) زمین لرزه بر پایه تکرار منظم انباش و رهايش تنجیدگی (Strain) در سنگ ها و یا پیش نشانگرهای (Precursor) دیگر را به رفتار آشوبناک (chaotic) پدیده زمین لرزه نسبت داده اند. ابتدا آشوب با نسبت دادن ویژگی برخالی (fractal) به ابعاد شکستگی توسط Aki (1981) در زلزله شناسی مطرح شد، آن گاه حضور این مفهوم در فرآیندهای زمین لرزه با استفاده از روش های نظری و قانون کاربردی، مانند بررسی چرخه های رفتاری مربوط به مدل سیستم گسله ها، مورد تأیید قرار گرفت. در حال حاضر سناریوی آشوب در زمین لرزه بیش تر با تحلیل های چند برخالی (multifractal) و با کمک معادله های لجستیکی (logistic equations) فراهم می شود (Hirabashi et al. 1992, Huang and Turcotte 1992). به طور مثال در سناریوهایی مربوط به دو نظریه مشابه، نماد آشوب در یکی به افت و خیز (fluctuation) مقدار تنجش (stress) و در دیگری به برهم کنش های پس خوردی (feedback interaction) آشوبناک نسبت داده شده است (Brune and Heaton 1992). اما از آنجا که شاخص سیستم های آشوبناک حساسیت بسیار زیاد آنها نسبت به اختلال های کوچک است، توصیف سناریو هرچه باشد، ویژگی آشوب به گونه خارج شدن سیستم از وضعیت عادی و چرخه رفتاری خود در نتیجه اختلال های کوچک و بروز رفتار کانورهای (random)، در آن ملحوظ شده است. این همان مفهومی است که ریشه عدم توفیق در پیش بینی تعیینی پدیده بحرانی زمین لرزه در آن نهفته است. پدیده ای اگر ریشه یابی در این راه با هدف تشخیص ماهیت، منشأ و مشخصه واسطه های برهم کنش درونی سنگ ها در شرایط گوناگون و دینامیک حاکم بر آنها میسر شود، پرسش های پیچیده و زنجیره ای دیگری را مطرح خواهد نمود.

مقدمه

گذشته های دور تا کنون، امیدوار بوده و هستند که زمین لرزه ها را پیش بینی نمایند. در این رابطه در سال های اخیر کوشش شده است تا معیاری نیز برای مفاهیم گاف (gap) و سکون (Seismic quiescent) لرزه ای تعیین شود. این روزها برای پیش بینی زمین لرزه بیش تر بر آورد و کنترل مقدار و آهنگ انباش تنجیدگی در مناطقی از گسله های

برپایه، شمارش و دسته بندی زمین لرزه های یک حوزه فعال، چرخه های ادواری، (Seismic Cycle pursued) بررسی نموده ها، و نشانه هایی که قبل از زمین لرزه ها آشکار می شوند، پژوهشگران، از



Chaos; the fundamental difficulty in deterministic prediction of earthquakes

By: Ali Akbar Eslami *

Abstract

Over centuries, various methods, generally based on either observation of precursors or models of regularly repeating buildups and releases of strain in rocks, have been used to predict earthquakes, but with little success. Failure in achieving a deterministic prediction has recently been attributed to the chaotic nature of the earthquake phenomenon. In this relation, Aki (1981) was the first who suggested that the number of earthquakes in a region has a fractal dependence on the characteristic dimension of the rupture. Later, this concept gained support from both theoretical analysis and applied techniques, such as the study of cyclic behavior of fault systems. At present, the chaos scenario for earthquake, is largely based on fractal analysis using logistic equations. For instance, in two similar hypotheses, the appearance of chaos is ascribed to the stress fluctuations in one and to the chaotic feedback interaction in the other. Since the chaotic index of a system is very sensitive to small agitations, scenario must include this property, regardless of the differences that they may have. This is the very sense that failure in deterministic prediction roots in it. Obviously, research efforts aimed at determination of nature, origin and characteristics of the interacting agents within rock bodies under variable conditions, and understanding of the governing dynamics, will lead to even more perplexing questions.

(evolution) زمینلرزه به دست آمده است، اما تا کنون نتیجه این پژوهش‌ها هم برای پیش‌بینی تعیینی زمین‌لرزه ناامیدکننده بوده است. حتی در مطلوب‌ترین موردها، صرف نظر از ناتوانی در تعیین آستانه (threshold) زمانی و مکانی رویداد، همواره تفاوتی بین آنچه روی می‌دهد و آنچه پیش‌گویی می‌شود وجود دارد. به طور مثال،

فعال مورد توجه قرار گرفته است. این کار با ابزار دقیق فیزیکی مانند تنجیدگی سنج (Strainmeter)، شیب سنج (tilt meter)، خزش سنج (meter Creep)، و مثلث بندی‌های لیزری و سایر تجهیزات جدید انجام می‌شود. پژوهشگران با این روش مصرانه امیدوارند که زمین‌لرزه‌ها را پیش‌بینی کنند. گرچه در این راه مفاهیم بیش‌تری در زمینه فرگشت

آن را به گونه‌ای کاتوره‌ای (random) به هم ریخته است و موجب ناکامی پیش‌بینی تعیینی زمین‌لرزه‌ها می‌شود.

منطقه‌بندی لرزه‌ای (Seismic zoning)

برای تقویم زلزله‌خیزی یک منطقه فهرستی از زمین‌لرزه‌های آن با طول زمانی کافی، که کفایت آن مربوط به صفت و درجه فعالیت منطقه لرزه‌خیز است، انتخاب و زمین‌لرزه‌های آن با جداسازی پس‌لرزه‌ها دسته‌بندی می‌شوند (اسلامی ۱۹۷۸). اطلاعات بر مبنای رابطه تجربی و خطی (Ishimoto and Iida (1939) and Gutenberg (1944) و تعیین واریانس (Variance) و انحراف معیار (Standard deviation) آن، زمینه زلزله‌خیزی منطقه تصویر شده و امکان مقایسه افت و یا فرایازی زمین‌لرزه‌های سال‌های آینده توسط آن فراهم می‌شود. به طور مثال، این شناسه (argument) برای منطقه شمال و مرکز کالیفرنیا بر پایه ۳۵ سال داده زلزله‌خیزی محاسبه و در زیرنویس * آورده شده است (Lomax and Uhrhammer 1984). گرچه چنین شناسه‌ای، با دقت زیادی که از واریانس آن مشاهده می‌شود، می‌تواند صفت زلزله‌خیزی منطقه را به خوبی تصویر کند، اما سال‌های کاهش یا فرایازی زمین‌لرزه‌ها از روی آن قابل پیش‌بینی نیست.

چرخه‌های ادواری لرزه‌ای (Seismic cycle pursued)

رویداد مکرر زمین‌لرزه مخرب در یک منطقه به ظاهر بهانه‌ای منطقی برای پیش‌بینی این رویداد در نظر گرفته شده است و سعی می‌شود از یافته‌هایی که در این زمینه به دست آمده، الگویی برای پیش‌بینی میان مدت این گونه زمین‌لرزه‌ها تقویم شود. پژوهشگران دریافته‌اند که در تاریخ زمین‌لرزه‌های برخی از مناطق زلزله‌خیز، در طول زمان‌های محدودی، به گونه‌ای شبه دوره‌ای، افزایش فعالیت زلزله‌خیزی مشاهده می‌شود (اسلامی و همکاران ۱۹۹۰). در میان این دوره‌های متناوب افزایش لرزه‌خیزی یک دوره آرامش نسبی نیز برقرار است (Sykes and Jaume 1990). اما تعمیم این یافته‌ها به سبب تنوع بروز زمین‌لرزه‌ها حکمی قطعی و جاری نیست و تخمین پیش‌گویی زمین‌لرزه برپایه وقوع مکرر رویدادهای بزرگ، چه در پیوند با چرخه‌های ادواری، و چه در رابطه با وقایع منفرد مکرر در یک گستره، تنها می‌تواند درصد احتمال وقوع رویداد را برای بخش مهندسی کاربردی زمین‌لرزه برای برآورد خطرپذیری (risk) آن محل فراهم سازد. چنان که بنا به گفته (Housner and Jennings (1982) احتمال وقوع رویدادی با دوره بازگشت R در هر سال معین برابر 1 است و این را می‌توان برای محاسبه احتمال رویداد در یک دوره زمانی درازتر نیز به کار گرفته. به طور مثال، برای یافتن احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای با میانگین دوره بازگشت صدسال در یک دوره صد ساله مشخص، احتمال این که دست کم یک بار چنین زمین‌لرزه‌ای

انتظار هفت ساله و پرهزینه پژوهشگران پارک فیلد در مورد وقوع زمین‌لرزه‌ای با درجه‌شش برای پایان سال ۱۹۹۲ گویی با تمسخر و سرزنش توسط گسله‌پویای سن آندریاس (San Andreas) پاسخ داده شد. بدین ترتیب که چند ماه قبل از پایان سال تنها زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۴/۷ درجه در آن محل واقع شد (Gary stix 1992). به گفته Bolt (1978) «معمولاً فرضیه بنیادی نیرومندی لازم است تا پیش‌بینی موثقی به گونه پیش‌بینی اهل قمر (Phases of the moon) یا نتایج واکنش‌های شیمیایی بر مبنای آن انجام شود. متأسفانه در حال حاضر هنوز فرضیه فرمول‌بندی شده معینی برای نحوه تکوین زمین‌لرزه وجود ندارد.» در توجیه این بیان که تا کنون (ماه مه ۱۹۹۴) نیز مصداق دارد، ممکن است گفته شود: تمامی زنجیره ساز و کارهای درون زمین که منجر به پیدایش زلزله‌ها می‌شوند هنوز به درستی شناخته نشده‌اند. در این صورت بی‌اطلاعی از نحوه تغییر نیروهای تکنیکی هر منطقه، که گاهی منشأ ناشناخته‌ای نیز دارند، امکان تحلیل روند فرگشت واقعی سنگ‌ها را در درازنای رشته فرآیندهایی که به زمین‌لرزه پایان می‌یابد تا کنون غیرممکن ساخته است. حتی در صورتی که فرض شود انبارش تنجیدگی به حد اشباع رسیده است، به گونه‌ای که در پارک فیلد (۱۹۹۲) گمان برده شده بود، برآورد بزرگی زمین‌لرزه که به گفته Brune (1992) متناسب با طول نامعینی از گسله است که جنبش موجی طی می‌کند، به سبب بی‌اطلاعی از موقعیت نقطه توقف آن (به گفته Heaton 1992) غیرممکن است. نیاز به چنین وقوفی اندیشه اصلی پژوهش‌ها و سناریوهای امروزی را در رابطه با نحوه فرآیندهای گسلش تشکیل می‌دهد.

چنان که برخی از پژوهشگران فرآیندهای زمین‌لرزه را با منطق ریاضیات بر خالی بررسی و ریشه‌یابی نموده‌اند، به طور مثال با این پیش‌گفته شده است که شماری از زمین‌لرزه‌های یک منطقه از نظر ابعاد شکستگی وابستگی بر خال دارند (Aki 1981). دیگران در تحلیل این بیان نشان داده‌اند که این وابستگی بر خال گواه بر آن است که توزیع لرزه‌خیزی یا فرآیندهای آشوبناکی انجام می‌گیرد، و نیز بر مبنای مدل سازی گواه معتبری فراهم نموده‌اند، که تغییر شکل پوسته زمین خود نمونه‌ای از یک آشوب تعیینی است (Turlotte 1992). Huang and (1992) افزون بر این، تحلیل‌های متداول امروزی حاصل مدل‌های بر خال که برپایه یک بر خال همگن خود همانند آماری (self-similar) (Statistically) بنا شده‌اند، نشان داده است که زمین‌لرزه‌ها مانند پدیده‌های بسیار پیچیده طبیعی چند بر خالی‌اند (Hirabashi et al. 1992). در تایید این نتیجه‌گیری (Heaton 1992) نیز مفهوم سیستم ناپایدار و آشوبناک زمین‌لرزه را چنین توصیف می‌کنند: «در این سیستم تنش‌های عمده زمانی برای چکاندن (trigger) و ایجاد زمین‌لرزه بزرگی کافی نیست، در حالی که در زمان دیگر اتفاق‌های کوچک ممکن است سبب بروز زمین‌لرزه نیرومندی بشود و نیز فاصله زمانی زمین‌لرزه‌ها ممکن است کوتاه یا طولانی باشد. این تعریف در واقع بیانی از حساسیت بسیار زیاد سیستم ناپایدار زمین‌لرزه نسبت به اختلال‌های کوچک است که به طور کلی شاخص سیستم‌های آشوبناک است. همین ویژگی بسیار غیرعادی این سیستم است که نظم مورد انتظار در فرآیندهای پایانی

$$\log N = -4/23 - 0/815 ML$$

$$6^2 = 0/000781 - 0/000792 ML + 0/000525 ML^2$$



است.

اندازه‌گیری‌های زمین پیمایشی (geodetic) نشان می‌دهد که در عرض ۶۰ سال به طور پیوسته بالا آمدن و فرونشست خط ساحلی در مجاورت Niigata انجام شده است. آهنگ این روند در پایان سال ۱۹۵۰ کم شده و به هنگام وقوع زمین‌لرزه ۱۶ ژوئن ۱۹۶۴ نی‌ئی‌گاتا یک فرونشست ناگهانی بیش از بیست سانتی‌متر در نزدیکی شمال مرکز سطحی این زمین‌لرزه آشکار شده است. البته این دریافتی است که فقط پس از وقوع زمین‌لرزه حاصل شده، نه در آستانه آن. به گفته Bolt (1978) «تکرار و تایید چنین تغییر قاطعی در سطح تراز به طور مسلم می‌تواند وسیله تضمین برخی پیش‌اطارها (forewarning) باشد». این بیان به طور ضمنی ارزیابی مکرر مدل‌های فیزیکی فرآیند آماده سازی (earthquake preparation) برای زمین‌لرزه و کنار گذاردن رقم‌های کاتوره‌ای را پیشنهاد می‌کند، زیرا همواره امکان درهم داخل شدن داده‌های اتفاقی و کاتوره‌ای در فهرست پیش‌نشانگرها وجود دارد. یکی از پیش‌نشانگرها راتغییر در آهنگ (Seismicity rate) لرزه‌خیزی یک منطقه در نظر گرفته‌اند (Bolt 1978)؛ در این صورت انتظار می‌رود که زیاد شدن خرد زمین‌لرزه‌ها (microearthquake) پیش در آمد رویداد بزرگی باشد، اما اغلب چنین نیست. خرد لرزه‌خیزی نابهنجار (abnormal) ممکن است دارای منشایی کاتوره‌ای، چکانیده، (triggered) یا حتی ناشناخته باشد به طور مثال، در بهار سال ۱۹۷۶ بیش از ۱۶۰۰ خرد زمین‌لرزه در ظرف زمانی کمی بیش از سه ماه در نورآباد ممسنی واقع شد که زمین‌لرزه شاخصی را در پی نداشت (گودرزی، شاه‌بنده ۱۹۷۶). همچنین لرزه‌خیزی‌های بی‌هنجار (anomalous seismicity) به ندرت پیرامون سدها بعد از آب‌گیری (Bolt 1978) و یا به گونه فوج زمین‌لرزه (Swarm) می‌توانند پیش‌نشانگر و هشدار دهنده محسوب شوند (Islami 1974; Richter 1957). و گرنه بی‌هنجاری و فرایازی رویدادهای یک منطقه فراتر از آهنگ زلزله‌خیزی معمولی (normal seismicity rate) آن در برخی سال‌ها وجود دارد (Collins and Uhrhammer 1987, Lomax and Uhrhammer 1984)، بی‌آنکه زمین‌لرزه‌ای با بزرگی بیش از بزرگی سقف زمین‌لرزه‌های زمینه‌زلزله‌خیزی منطقه در جمع آن‌ها واقع شده باشد (اسلامی و همکاران ۱۹۹۰). یکی دیگر از پیش‌نشانگرها ره‌ایش گاز رادون از طریق چاه‌های ژرف و منفر آب‌های معدنی در درازای زون یک گسله فعال است. در این رابطه افزایش قابل توجهی در جمع شدن گاز رادون در این گونه مکان‌ها قبل از زمین‌لرزه در برخی از مناطق کشور شوروی سابق گزارش شده است (Bolt 1978). با وجود این، به سبب عدم آگاهی از حدود تغییرات طبیعی این گاز در سنگ‌ها، که کم و کیف آن نیز متناسب با وضع زمین‌ساختی هر منطقه فرق می‌کند، امکان رصد مطلوب آن در همه جا میسر نیست. به فرض این که به طور کلی پیش‌نشانگرهای وابسته به فرآیندهای آماده سازی زمین‌لرزه را بتوان از نمود حاصل از فرآیندهای مستمر کاتوره‌ای و نوفه (noise) زمینه جدا کرد، هدف نهایی تعیین آستانه وقوع زمین‌لرزه مورد پیش‌بینی است که به هر دلیل تحصیل آن تا کنون نوسید کننده بوده است. به طور مثال، در دنبال چنین هدفی، Rikitake (1981) بدون

روی دهد، و نیز احتمال این که صدسال بگذرد بی‌آن که این زمین‌لرزه واقع شود، در نظر گرفته می‌شود. این دو احتمال همه صورت‌های ممکن را در بردارند و از این رو مجموع آن‌ها باید برابر یک باشد. بنابراین، احتمال در امان بودن از زمین‌لرزه صدساله در هر سال ۰/۹۹ و در هر دو سال $0/99 \times 0/99 = 0/9801$ ، و به همین سان برای سال‌های بیش‌تر است، و از آنجا می‌توان نوشت $0/9801 = 1 - (0/0199)^{100}$ که در آن P_{100} احتمال رویداد یک بار یا بیش از یک بار وقوع زمین‌لرزه دارای میانگین دوره بازگشت صدسال در یک دوره صدساله معین است. رقم ۳۷٪ ($0/37 = 1 - 0/9801$) احتمال روی ندادن یک زمین‌لرزه در طول این صد سال است. امکان دارد در برخی از این دوره‌های صدساله دو یا سه زمین‌لرزه روی دهد. برای مثال، اگر ریسمانی به طول ده متر در نظر گرفته شود که در طول آن صد گره به طور کاتوره‌ای زده شده باشد، آن‌گاه ریسمان را به تکه‌های مساوی ده سانتی‌متری ببریم، بدیهی است برخی از تکه‌ها گرهی در خود نخواهند داشت؛ بسیاری از آن‌ها یک گره، و برخی از آن‌ها دارای دو گره یا بیش‌تر در یک تکه خواهند بود. گاهی برآورد رویداد زمین‌لرزه یا جنبش‌های زمین را بدین شکل بیان می‌کنند. قابل توجه است که دوره بازگشت دراز مدت هر قدر طولانی فرض شود، تنها شانس ۶۳ درصد را برای رویداد احتمالی برآورد می‌نماید. بدیهی است این تخمین آماری از پیش‌بینی، آن‌هم پیش‌بینی تعینی زمین‌لرزه، فاصله بسیار دارد.

پیش‌نشانگرها

از پیرامون و خاستگاه یک زمین‌لرزه بزرگ در حین فرگشت و آمادگی فیزیکی زمین، قبل از وقوع نمودهای آگاه کننده‌ای به صورت‌های گوناگون آشکار می‌شود، که به طور کلی پیش‌نشانگر نامیده شده‌اند. این پیش‌نشانگرهای وابسته به فرآیندهای پوسته زمین در نمود تغییر در تراز سطح دریا، کج شدگی، تنجیدگی، و مانند آن‌ها و در بی‌هنجاری‌های زمین مغناطیسی، گرانی، ژئوالکتریک، پرتوزایی سنگ‌ها، و دیگر نمودها نمایان می‌شوند. نشانه‌ها یا به گونه‌ای عینی و کمی - مانند ازدیاد ضربه در ثانیه گاز رادون رها شده از درز و شکاف سنگ‌ها در چشمه‌های معدنی، و بالا آمدگی و فرونشست سطح زمین قابل اندازه‌گیری‌اند، و یا به صورت کیفی در مفاهیم گاف‌ها و سکون‌های لرزه‌ای قابل تفسیر می‌شوند. ساز و کارهای اساسی درون زمین که منجر به پیدایش زمین‌لرزه‌ها می‌شوند هنوز به طور مستقل شناخته نشده‌اند و به طور کلی پدیده زمین‌لرزه را در رابطه نزدیک با فرآیندهای مستمر تکتونیکی که در زوی زمین موجب پیدایش پشته‌ها (ridge) و تراسه‌های (trench) زیراقیانوسی می‌شوند می‌پندارند (Clough and Penzien 1974) و بنابراین، تفکیک پدیده‌هایی که قبل از زمین‌لرزه‌ها واقع می‌شوند از نمود سایر فرآیندهای تکتونیکی خالی از اشکال نیست. افزون بر این، مشکل عمده تشخیص حد پایانی این نمودها و تعیین آستانه زمانی و مکانی واقعه مورد انتظار است. به طور مثال، سراسر کناره‌های باختری جزیره هونشو ژاپن به منظور اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین میخ کوبی و (benchmark) گذاری شده

ارزیابی کامل مدل فیزیکی فرآیند آماده‌سازی، با فراهم نمودن فهرست پیش‌نشانگرهای گوناگون به تحلیل آن‌ها پرداخته است. او پیوند برخی از آن‌ها را با بزرگی زمین‌لرزه و زمان پیش‌نشانگری با صرف‌نظر نمودن از مسافت پیش‌نشانگری (فاصله‌نمود تا چشمه) خطی انگاشته و نشان داده است که هرچه رویداد مورد پیش‌بینی بزرگتر باشد، این پیش‌نشانگرها با فاصله‌زمانی بیش‌تری نسبت به آستانه‌رویداد نمایان می‌شوند. در این رابطه (Niazi 1985) به کار (1981) Rikitake خرده گرفته و خود با دخالت دادن مسافت و برحسب وایازی (regression) خطی چندگانه، پیوندی بین دامنه‌مینگال پیش‌نشانگری، بزرگی زمین‌لرزه مورد پیش‌بینی، مسافت و زمان پیش‌نشانگری نسبت به آستانه‌رویداد قابل شده است (Niazi 1985؛ در بهار ۱۳۷۲). با وجود این، او در می‌یابد که همبستگی این پیش‌نشانگرها نسبت به بزرگی و فاصله همخوان نیست، و به سبب رفتار کاتوره‌ای برخی از پیش‌نشانگرها، از جمله کج‌شدگی، نیز بهای کمتری در تحلیل خود به آن‌ها می‌دهد در حالی که وسوسه‌شناختن همین بی‌نظمی‌ها در روند فرآیندهای وابسته به زمین‌لرزه‌ها سبب مطرح شدن باب آشوب در زمین‌لرزه شده است. (Hirabayashi et al. 1992, Turcotte and Aki 1981, Huang)

بدیهی است در این باب پیش‌نشانگرهایی که رفتار کاتوره‌ای دارند باید از ارزش بیش‌تری برخوردار باشند زیرا چنین رفتاری می‌تواند خود نمادی از وجود آشوب در فرآیند آماده‌سازی زمین‌لرزه محسوب شود و معرف سیستمی آشوبناک باشد و گرنه در سیستمی با دیدگاهی قالبی و متأثر از دترمینیسم (determinism) (معین‌نگری) مکانیک کلاسیک، و با مشاهده‌انبوهی از پیش‌نشانگرها، می‌بایست تا کنون پیش‌بینی تعیینی زمین‌لرزه دست کم در موارد بسیار مطلوب انجام می‌گرفت. پس این وجود آشوب است که همواره به شکل‌های گوناگون در پایان کار مانع اساسی پیش‌بینی تعیینی زمین‌لرزه می‌شود. در سیستم آشوبناک زمین‌لرزه برحسب توصیف (1992) Heaton زمانی با وجود تجمع تنش‌های عمده و آشکار شدن سایر پیش‌نشانگرها (به گونه‌ای که در پارک فیلد اتفاق افتاد، برای پایان سال ۱۹۹۲) رویداد مورد انتظار واقع نمی‌شود، در حالی که در زمانی دیگر بی‌وجود پیش‌نشانگری بارز و تنش‌های قابل توجه، ممکن است اتفاق‌های کوچک سبب چکاندن زمین‌لرزه‌بزرگ غیرمنتظره‌ای به سان زمین‌لرزه‌ای که در هفدهم ژانویه ۱۹۹۴ در لس‌آنجلس واقع شد بشود. گفتنی است که تنها در مورد زمین‌لرزه Haicheng با بزرگی ۷/۳ در مقیاس موج‌های سطحی که در تاریخ چهارم فوریه ۱۹۷۵ در سرزمین‌های پایانی شمال خاوری چین واقع شد، اطلاعات هشدار دهنده‌ای قبل از وقوع صادر شد (Mileti 1981). چنین اقبالی را وقوع پی در پی زمین‌لرزه‌های بزرگ از سال ۱۹۶۶ تا سال ۱۹۷۰ در شمال خاوری چین، همزمان با قوت گرفتن احتمال مهاجرت کانونی (foci migration) فراهم نموده بود افزون براین، مشاهده‌انواع پیش‌نشانگرها، به ویژه کج‌شدگی زمین و تغییر جهت ناگهانی و متقابل این کج‌شدگی در ۳۰ ژانویه ۱۹۷۵ و شتاب در افزایش آهنگ آن که نشانه‌های هشدار پایانی محسوب شدند، منجر به تصمیم‌گیری و

صدور اطلاعیه شده بود (Zongjen 1990). با وجود این، چنین اقبالی در حوزه‌احتمالات قرار می‌گیرد، زیرا پیش‌نشانگر نماد است نه معیار تا بر مبنای آن حکمی قطعی صادر شود. از طرفی اغتشاشی که به شکل رفتار کاتوره‌ای در پیش‌نشانگرها نمایان می‌شود، وحدت لازم برای مشاهده‌مکرر تغییر معینی را در نمونه‌های مختلف که به گفته (1978) Bolt می‌تواند وسیله‌تضمین برخی پیش‌اخطارها باشد از بین می‌برد. شاید بیش‌تر به همین دلیل بود که سال بعد، ۱۹۷۶، امکان استفاده از سناریوی اجرا شده در هایدچنگ، با وجود همانندی نوع پیش‌نشانگرها در رابطه با هشدار برای وقوع زمین‌لرزه‌عظیم Tangshan که در استان دیگری از شمال‌خاوری چین رویداد، میسر نشد. در حالی که برای این زمین‌لرزه انواع پیش‌بینی‌های درازمدت، میان مدت، و کوتاه مدت انجام گرفته بود و از سال ۱۹۷۴ وقوع زمین‌لرزه‌ای را در شمال Wan Bohai پیش‌گویی کرده بودند همچنین در نیمه‌دوم سال ۱۹۷۵ بی‌هنجاری‌هایی در اندازه‌گیری‌های کج‌شدگی زمین و سایر پیش‌نشانگرها مشاهده شده بود، حتی از حدود آوریل ۱۹۷۶ مشاهده وارونه‌شدن کج‌شدگی و بی‌هنجاری‌های دیگر و شتاب گرفتن آهنگ آن‌ها، که تا زمان وقوع زمین‌لرزه‌تانگشان ادامه داشت، نتوانست به گونه‌رویداد هایدچنگ منجر به تصمیم‌گیری و صدور اطلاعیه شود. سرانجام در ۲۸ ژوئیه ۱۹۷۶ زمین‌لرزه‌عظیم تانگشان با بزرگی ۷/۸ در مقیاس موج‌های سطحی و با شدت یازده درجه‌م‌ر کالی در ژرفای یازده کیلومتری در بخش Lunan شهر تانگشان روی داد (از بهار ۱۳۷۲ و گزارش علوم زمین‌لرزه‌شمال چین، ۱۹۸۸). در واریسی جز به جز این رویداد ملاحظه می‌شود که با وجود تشابه نوع پیش‌نشانگرها، تفاوتی در وزن، شتاب بی‌هنجاری‌ها، و توزیع مکانی و زمانی آن‌ها وجود دارد. در این صورت، پذیرفتنی است که این تفاوت‌ها باید ناشی از وضعیت زمین‌شناختی و تکتونیک ناحیه‌ای آن‌ها باشد. با این فرض که شرایط حاکم بر واسطه‌های برهم کنش سنگ‌ها نیز در رفتار کاتوره‌ای و آشوبی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین تفاوت‌ها، و با حضور آشوب، امکان یافتن الگویی عام و تضمین شده حتی برای پیش‌اخطار و هشدار هم میسر نخواهد شد، چه رسد به پیش‌بینی تعیینی این پدیده‌بحرانی و آشوبناک.

گاف (gap) و سکون لرزه‌ای (Seismic quiescence)

واژه‌گاف به طور اعم، گاف لرزه‌ای، (seismic gap) گاف زلزله‌خیزی، (Seismicity gap) سکون لرزه‌ای، و نظایر آن سرخط مفاهیمی هستند که از طرف کسانی که در زمینه زلزله‌خیزی و پیش‌بینی زمین‌لرزه کار می‌کنند بیان شده است. به طور مثال (1983) al. Haberman et در تفسیر مشاهدات خود در این زمینه، و برای معرفی گاف لرزه‌ای، می‌گویند: «یک قطعه از ورقه‌سنگی (قطعه‌ای که در اثر زمین‌لرزه جا به جا شده است) نمی‌تواند زیاد از قطعه‌های همجوار خود جلو بیافتد، بدون آن که سایر قطعه‌ها طی زلزله‌های بزرگ به آن برسند». طبق این اظهار، قطعه‌های عقب مانده گاف‌های لرزه‌ای هستند که، بازهم به روایت اینان، با بروز زلزله‌های کم‌ژرفا و



سرتاسر آن ضعیف‌تر است، به طوری که گرمای ناشی از لغزش صخره‌ها تحت اثر تنش‌های اصطکاکی نیرومند، در آن ملحوظ نیست. از طرفی جمعی دیگر از لرزه‌شناسان شروع به مطرح کردن این پرسش نموده‌اند که زمین‌لرزه‌های به ظاهر تکرار شده مانند رویدادهای پارک فیلد، آیا واقعاً الگوی یکسانی را دنبال می‌کنند؟ به باور اینان، این گونه زمین‌لرزه‌ها ممکن است بر روی مناطق گسلی متفاوتی روی داده باشند با مطرح شدن این مطالب، و به ویژه بی‌هنجاری‌های گفته شده، عده‌ای دیگر هم اظهار نظر کرده‌اند که شکسته شدن گسله‌ها ممکن است مشمول پدیده‌های آشوبناک باشند، که همین مورد سبب پیچیدگی پیش‌بینی زلزله بر اساس مدل‌هایی می‌شود که بر تکرار منظم انباشته شدن و آزاد شدن تنش‌گذاری در سنگ بنا شده است.

در توجیه نحوه شکستن گسله‌ها، Brune از دانشگاه نوادا در رنو و Heaton از علوم زمین آمریکا در پاسادنا، به طور جداگانه نظریه‌هایی با زمینه مشترکی مطرح کرده و گفته‌اند: «زمین‌لرزه پس از شروع به صورت جنبش موج‌واری (Wave like) در طول گسله با چین و شکن (ripple) حرکت می‌کند و با این کار فشاری که دو قطعه متقابل گسله را به هم نگاه داشته است کاهش می‌یابد حتی در مواردی که مقدار استرس (تنش) خیلی عظیم نیست، این تأثیر می‌تواند جنبش بزرگی در طرفین گسله ایجاد کند. Brune، که از تجربه با بلوک‌های اسفنجی تاییدی برای این تأثیر چین و شکن افتادگی یافته است، این تأثیر را به شگرد کار موکت کارها در میزان کردن موکت تشبیه می‌کند که به جای حرکت دادن تمام سطح موکت که خیلی دشوار است، چین و چروکی را در آن به حرکت در می‌آورند. در فرضیه او، بزرگی هر زمین‌لرزه متناسب است با طول نامعینی از گسله که این جنبش موج‌وار چین و شکن دار در آن منتشر می‌شود. پیش‌رفت این جنبش در طول گسله ممکن است تا جایی ادامه پیدا کند که سنگ‌های سخت به هم پیوسته شده یا محل پیش گسله آن را متوقف کند. اما Heaton ادعا می‌کند که دانستن این که جنبش کجا و چگونه متوقف می‌شود غیرممکن است. او باور دارد که تفاوت بین یک زمین‌لرزه کوچک که روزانه چهل بار در جنوب کالیفرنیا واقع می‌شود و زمین‌لرزه بزرگی که همه از وقوع آن بیمناک‌اند بستگی به چیزی دارد که وی آن را «دینامیک شکستگی» می‌نامد. Heaton عقیده دارد که برهم کنش پس‌خوردی «آشوبناک» می‌تواند میزان لغزش گسله را افزایش دهد مقدار اصطکاک و تنش، مقدار جنبش گسله را کنترل می‌کند، در حالی که درست برعکس آن، جنبش شکستگی به طور مداوم مقدار اصطکاک در سطح گسله را تغییر می‌دهد» برخی از این اندیشه‌های نوپا پیش‌بینی زمین‌لرزه را دچار مشکل می‌سازند. مفهوم یک سیستم ناپایدار آشوبناک در این است که زمانی ممکن است تنش‌های بزرگ برای چکاندن زمین‌لرزه بزرگی کافی نباشند، در حالی که در زمانی دیگر، رویدادهای کوچک سبب بروز لرزش بزرگی بشوند. همچنین فاصله زمانی زمین‌لرزه‌ها گاهی کوتاه است و گاهی طولانی. پژوهشگرانی دیگر مانند Lindh حاضر نیستند در به کار گرفتن الگوهای قدیمی سهمی باشند. در حالی که، به طور مثال، این الگوها به پیش‌بینی موفقیت آمیز زمین‌لرزه Loma prieta اشاره می‌کند،

بزرگ ($M \geq 7$) و اماندگی‌شان جبران خواهد شد. همچنین در مورد نبود لرزه‌ای در مرز صفحه‌ها و مناطق فرورانشی (Subduction) گفته‌اند: «یک گاف لرزه‌ای عبارت از قسمتی از یک مرز صفحه‌ای است که در طول سده‌های اخیر در آن زمین‌لرزه بزرگی واقع نشده و شکستگی پیدا نکرده باشد» [در حالی که (1983) et al. Havskov باور دارند که برخی از این نواحی برای حتی یک قرن یا بیش‌تر از حرکت بازمانده‌اند]، نیز اظهار نموده‌اند که: «سکون لرزه‌ای پیش‌نشانگر (Precursory quiescence) عبارت است از یک سکون لرزه‌ای زمانی (temporal quiescence) که در داخل یا اطراف زون شکسته یک زمین‌لرزه قبل از وقوع آن اتفاق می‌افتد» یا «زون‌های شکسته شده زمین‌لرزه‌های بزرگ توسط پس‌لرزه‌های آن‌ها مشخص می‌شوند» همچنان این تعریف‌ها برای معرفی و تفهیم واژه‌های فوق از طرف Mogi (1979)، Kelleher (1970, 1973, 1975) و Ohtake et al (1977) و Wyss (1979) نیز اظهار شده است. بدیهی است این پژوهشگران با توجه به یافته‌ها و ذخایر ذهنی خود نموده‌های بیش‌تر کیفی قبل از وقوع زمین‌لرزه‌ها را در قالب واژه‌های گفته شده هریک به گونه‌ای توصیف کرده‌اند، اما از تقریظ‌ها یا خرده‌گیری‌هایی که به کار هم وارد نموده‌اند، (1983) Lomnitz چنین دریافت می‌شود که هنوز تعریف نهایی این فرآیندهای پیچیده در گرو معرفت بیش‌تر نسبت به سیستم گاف‌ها و سکون‌های مکانی (Space quiescence) یا زمانی قبل از زمین‌لرزه‌ها است. در واقع اگر پیکربندی اولیه این سیستم‌ها شناخته شود، فرگشت زمانی (temporal evolution) یا مکانی (space evolution) آن‌ها بهتر تحت نظارت قرار خواهد گرفت. با وجود این، بنابر همین اظهارات به کمال نرسیده، سراسر کناره‌های مکزیک و امریکای مرکزی در اقیانوس آرام منطقه‌بندی شده و در بین منطقه‌های شکسته شده توسط زمین‌لرزه‌ها و همچنین مرکز زلزله‌های بزرگ، موقعیت گاف‌ها تعیین، و با قبول مفاهیم بیان شده و برآورد مدت توقف این ورقه‌ها مناطقی تحت اخطار واقع شده، در انتظار بروز وقایع بزرگ آینده زیر نظر قرار گرفتند. اما چندی بعد این طرح در مقاله‌ای بحث‌انگیز که در دسامبر ۱۹۹۱ به چاپ رسید زیر سؤال رفت. Kagan and Jackson (1991) از دانشگاه کالیفرنیا اعلان کردند کوششی که برای به کار بردن نظریه گاف لرزه‌ای در مورد مناطق گسلی حاشیه اقیانوس آرام به عمل آمده است، در پیش‌بینی مکان ۴۰ زمین‌لرزه بزرگ که بین سال‌های ۱۹۷۹ و ۱۹۸۹ واقع شدند ناکام بوده است. البته Nishenko and Sykes، به ترتیب از سازمان زمین‌شناسی آمریکا و دانشگاه کلمبیا، به نمایندگی از یکی از مراکز اصلی بررسی پیش‌بینی بر پایه گاف لرزه‌ای، در مقام دفاع از طرح فوق به آن‌ها پاسخ دادند. آن‌ها گفتند که نیمی از زمین‌لرزه‌های ادعا شده توسط (1991) Kagan and Jackson معیاری برابر آنچه برای پیش‌بینی در نظر گرفته بودند (از لحاظ اندازه، نوع، مرز صفحه قراردادش، و مانند آن) نداشته است. این مناظره به همین جا ختم نشد و زلزله‌شناسان با دیدگاه دیگری به بحث خود در این زمینه هنوز ادامه می‌دهند. به طور مثال جمعی بی‌هنجاری در گسله‌سن آندریاس را مطرح می‌کنند و می‌گویند در حالی که این گسله در عمل بسیار فعال است، سطوح تنش نظیر در

و کند سیستم را به مرحله‌ای می‌رساند که ناگهان در جهتی پیش‌بینی نشده متحول می‌شود. در این پدیده طبیعی پیش‌بینی نتیجه تحول آن در بازه آشوبناکی و به هنگام بروز چرخه رفتارهای کاتوره‌ای امکان پذیر نیست، مگر با حدس و احتمالات آماری (Huang and Turcohe 1992). چنانچه در آغاز شارش متلاطم یک شاره به هنگام گرم شدن حرکت کند، شاره ناگهان با یک پرتاب شدید پیش‌بینی نشده قطع می‌شود (Allegre 1978). از دیدگاه ریاضی، پدیده‌های بحرانی از مثال‌های بارز پدیده‌های فیزیکی غیرخطی‌اند، که امروزه با ریاضیات برخالی تحلیل می‌شوند این روش‌های ریاضی را در ابتدای سده بیستم (Poincare) Henri) ریاضی‌دان فرانسوی، در تحلیل پدیده‌های دارای برهم کنش درونی (Configuration interaction) به کار گرفته اما پی‌گیری این روش پس از یک توقف پنجاه ساله، این روزها در فیزیک مدرن متداول شده است. برای یک حرکت منظم قابل پیش‌بینی و فرمول‌بندی شده، ضروری است که در معادله حرکت آن تکینگی (Singularity) ایجاد نشود (Dresden 1992). به طور مثال، ممکن است معادله حرکتی در فاصله‌هایی از گستره فیزیکی کمیت‌های متغیر خود خوش رفتار، و به ازای مقدار معینی از متغیرها در بین این فاصله‌ها تکین (singular) باشد البته، به گفته (Dresden 1992)، برای تکینگی می‌توان یک تعریف دقیق ریاضی ارائه داد. ولی در این جا کافی است گفته شود که در تکینگی رفتار فیزیکی غیرعادی است. همچنین در سال‌های اخیر پدیده‌های بحرانی را در بانی به نام فیزیک و هندسه بی‌نظمی (disorder) (Physics and geometry of) مطرح می‌کنند چنان که، به باور (1986) Afros در این باب نظریه پراکندگی Percolation (نظریه‌ای که در رابطه با فرآیند نفوذ Penetration به داخل ماز fissure, crack پیچ در پیچ تشکیلات شبکه‌ها مطرح شده است) پدیده‌های بحرانی را به بهترین وجه توصیف می‌کند. با این که در فیزیک و هندسه بی‌نظمی تایید می‌شود که خاصیت فیزیکی کلیه پدیده‌های بحرانی بسیار غیرعادی است، اما این پدیده‌ها در برخی وجوه اشتراک دارند از مهم‌ترین آن‌ها یکی این است که به نظر می‌رسد در مجاورت نقطه بحرانی، سیستم به صورت بلوک‌هایی با خاصیت‌های متفاوت درهم می‌شکند همچنین اندازه هر بلوک آن قدر رشد می‌کند که سیستم به نقطه بحرانی می‌رسد. شکل بلوک‌ها کاملاً کاتوره‌ای و به دلیل بزرگی، مستقل از ساختار اتمی ماده‌اند و در دستگاه‌های کاملاً غیرمشابه مشترک‌اند، به طوری که فراگیرندگی خاصیت‌های فیزیکی در مجاورت نقطه‌های بحرانی را نشان می‌دهد. رسیدن به چنین عامیتی در رابطه با خاصیت‌های فیزیکی در سیستم‌های آشوبناک پیش‌ساخته مدل شده، این روزها به کمک رایانه‌ها و امکانات گرافیکی آن‌ها در تهیه نقشه‌های لجستیکی نیز میسر شده است (1992) (Huang and Turcotte). از طرفی، به گفته (Dresden 1992)، به طور کلی معلوم شده است که رفتار آشوبی، برخلاف تصورات قبلی، تقریباً یک خاصیت عمومی است و نه رفتار ناپسند برخی سیستم‌های پیش ساخته (Bown 1992). با این توصیف، آشوب خاصیتی است که در اصل در سیستم‌های طبیعی از آستانه ناپایداری و یا پیش آمدن یک تکینگی در معادله حرکت آن‌ها آشکار و در یک بازه زمانی نامشخص، متأثر از

که سبب خرابی وسیعی در خلیج سان‌فرانسیسکو شده است. Lindh باور دارد که برخی از فرضیه‌های جدید، گرچه آزمایش نشده‌اند، ممکن است دیدگاه معیاری، توضیح زمین‌لرزه‌های کوچک را که موافق الگوهای متداول نیستند تکمیل نمایند. او نظرات برون و هیتن را «جالب اما بسیار شخصی» توصیف می‌کند. همچنین مدعی است که بیش از چند دهه دیگر لازم است تا قطعات معمای لرزه‌ای جا بیفتد و تصویر روشنی را از اینکه چگونه و کجا زمین‌لرزه بزرگ بعدی به گمان واقع می‌شود نشان دهد.

با وجود بیان این مطلب، او سخنان ریشتر را در اندیشه دارد که گفته است «تنها احمق‌ها، دروغگوها، و حقه‌بازها زمین لرزه را پیش‌بینی می‌کنند» (Stix 1992) به نظر می‌رسد سخنی چنین بی‌پرده از شخصیتی چون ریشتر تنها خطاب به مدعیان فرصت طلب پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها باشد، و گرنه دریافت‌های پژوهشگران واقعی همسو با دیدگاه این دانشمند والا مقام پیچیدگی‌هایی را که در این راه وجود دارد بیان نموده‌اند. به طور مثال در نتیجه گیری‌های پژوهش‌های جدید آمده است: «مادر یافتیم که زمین‌لرزه‌ها مانند بسیاری از پدیده‌های پیچیده طبیعی برخال چندگانه‌اند» (Hirabayashi et al. 1992). یا گفته‌اند: «مدل گسله‌ای که به کار بردیم چنین نتیجه داد که دشواری اساسی در راه پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها وجود دارد و این پیش‌بینی نیاز به تقریب‌های احتمالی دارد» (Huang and Turcohe 1992).

بحث و نتیجه گیری

بسیاری از پدیده‌های طبیعی که از معادله‌های تعیینی (equations deterministic) پیروی می‌کنند تحت شرایطی رفتار آشوبناک نشان می‌دهند شرط لازم برای این آشوب تعیینی (deterministic chaos) داشتن حساسیت نمایی نسبت به تغییراتی در شرایط اولیه است (1992) (Huang and Turcohe). چنین مفهومی در گفته (Bown 1992) نیز ملحوظ است که می‌گوید: «شاخص سیستم‌های آشوبناک، حساسیت بسیار زیاد آن‌ها نسبت به اختلال‌های کوچک است» او با روایت این استعاره که: «بال زدن پروانه‌ای در چین می‌تواند هفته‌ها بعد به توانایی در گلاسکو بینجامد» ظرافت این حساسیت را بیان کرده است. این اثر پروانه ریشه پیش‌بینی ناپذیری سیستم‌های آشوبناک است (1992) (Bown). بیش از متداول شدن باب آشوب، این پدیده‌ها در فیزیک به نام پدیده‌های بحرانی (Critical Phenomena) نامیده شده‌اند. به گفته (1986) Afros صفت مزیزه آن‌ها وجود یک نقطه بحرانی است که در آن برخی از خاصیت‌های سیستم دستخوش تغییرات ناگهانی می‌شود. به طور مثال، شارش متلاطم شاره‌ها (turbulent flows of fluids) (به هنگام جوش)، گذارهای فاز مرتبه دوم (Second order Transition) (مانند گذار یک فلز از فاز متعارف به فاز ابر رسانایی، Superconductivity) هنگامی که دمای آن کاهش داده شود، و همچنین پدیده‌های گسیختگی rupture (که در آن‌ها افزایش اندک بار اضافی سبب درهم شکستن تکیه‌گاه می‌شود) از جمله پدیده‌های بحرانی به شمار می‌آیند (مثال‌ها به ترتیب از هوآنگ، افروس، و آلکر نقل شده‌اند). با بیانی دیگر، در پدیده به بحران رسیده، در واقع فرآیندهای مستمر، تدریجی،



نقطه بحرانی اشاره می‌شود که در آن برخی از خاصیت‌های سیستم دست‌خوش دگرگونی ناگهانی می‌شوند (گذار فاز مرتبه دوم و شارش متلاطم شاره‌ها). با چنین فرضی، جنبش بزرگ ایجاد شده طرفین گسله در غیاب تنش‌های خیلی بزرگ، با شرایطی که سبب جلوافتادن نقطه‌های بحرانی و تغییرات آشفته پیش از آن می‌شود، قابل مقایسه است (مانند جلو افتادن نقطه جوش و آشفته‌گی‌های پیش از آن). در نظریه Brune بزرگی هر زمین‌لرزه متناسب است با طول نامعینی از گسله که این جنبش موجی در آن منتشر می‌شود. پیش‌رفت این جنبش در طول گسله ممکن است تا جایی ادامه پیدا کند که سنگ‌های سخت به هم چسبیده یا یک خمیدگی در سطح گسله آن را متوقف کند. اما Heaton ادعا می‌کند دانستن این که جنبش کجا و چگونه متوقف می‌شود غیرممکن است. او معتقد است که تفاوت میان زمین‌لرزه کوچک و زمین‌لرزه بزرگ در پویایی و هیئت آن است، که وی آن را «دینامیک شکستگی» می‌نامد و پیشنهاد می‌کند در این هنگامه برهم‌کنش پس‌خوردی «آشوبناک» می‌تواند لغزش گسله را تقویت کند و مقدار اصطکاک و تنش، مقدار جنبش گسله را کنترل کند، در حالی که درست برعکس آن، جنبش شکستگی پیوسته مقدار اصطکاک در سطح گسل را تغییر می‌دهد.

به نظر می‌رسد در تمامی صحنه‌پردازی‌های این سناریو سعی شده است بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در گسله‌های تحت کنترل (به ویژه سن آندریاس)، با خاصیت فیزیکی غیرعادی و بی‌نظمی‌هایی که در اطراف نقطه‌های بحرانی وجود دارند انطباق داده شود. در این رابطه، با کنارگذاشتن زمان و نحوه فرگشت پدیده بحرانی زمین‌لرزه، سناریو به طور مقطعی تنها از مجاورت نقطه بحرانی، تا پایان فرآیندهای گسلش توصیف شده است. چنانچه پدیده موج افتادگی در کل پیکربندی گسله (fault configuration)، به گفته برون، و نقش برهم‌کنش پس‌خوردی، در پندار هیتن، هریک موردی فرضی و برگزیده (نمادی از وجه اشتراک پدیده‌های بحرانی) از همان آشفته‌گی‌های کاتوره‌ای در مجاورت نقطه‌های بحرانی‌اند. بنابراین، تأثیر واسطه‌های برهم‌کنش کاتوره‌ای در افت و خیز مقدار تنش در صحنه‌پردازی برون، یا نقش برهم‌کنش‌های پس‌خوردی در توصیف هیتن با تعریف خاصیت آشوبی (اثر پروانه) همخوان می‌شود. این انطباق نه تنها دلیلی برای ریشه‌پیشینی ناپذیری فرجام فرآیندهای گسلش به سبب آشوب محسوب می‌شود، بلکه افت و خیز مقدار تنش به طور کلی امکان پیش‌بینی تعیین بزرگی زمین‌لرزه را حتی با وجود تخمین انباشت تنشیدگی غیرممکن می‌سازد (چنان که در زمین‌لرزه پارک فیلد ۱۹۹۲ چنین شد).

سیاس‌گذاری

از آقای دکتر جعفر شجاع‌طاهری به واسطه خواندن دستنویس، و توصیه‌های منطقی و از آقای دکتر جمشید حسن‌زاده به واسطه تصحیح خلاصه انگلیسی این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

واسطه‌های برهم‌کنش سیستم، ادامه می‌یابد. این تأثیرپذیری همان حساسیت زیاد سیستم نسبت به اختلال‌های کوچک است که در قالب استعاره «اثر پروانه» ریشه پیش‌بینی ناپذیری سیستم‌های آشوبناک محسوب می‌شود.

زمین‌لرزه‌ها از جمله پدیده‌هایی‌اند که در بازه زمانی ثانیه تا حدود دقیقه واقع می‌شوند. در حالی که گاهی فرگشتی همزمان با زمان‌های زمین‌شناختی دارند. بنابراین، در ردیف پدیده‌های بحرانی قرار دارند که در فیزیک ناپایداری‌ها مطرح می‌شوند، و نیز چنانچه گفته شد، در فیزیک و هندسه بی‌نظمی به خوبی قابل توصیف‌اند. همچنین از آن زمان (۱۹۸۱) که وابستگی برخالی در مشخصه بعدی شماری از زمین‌لرزه‌ها مشاهده شده، بررسی خاصیت آشوبی در فرآیندهای زمین‌لرزه نیز متداول شده است. در حال حاضر وجود آشوب نه تنها در فرآیند شکستگی و توزیع زلزله‌خیزی (Huang and Turcotte 1992) گواهی شده است، بلکه رد (trace) آن در سایر فرآیندهای مربوط به زمین‌لرزه‌ها نیز تحت بررسی قرار گرفته است. خاصیت آشوبی در فرآیندهای گسلش از آستانه گسیختگی آغاز می‌شود، و برحسب نظریه Brune and Heaton (1992)، در یک بازه زمان گرفته از دوام برهم‌کنش‌های پس‌خوردی به صورت کاتوره‌ای ادامه می‌یابد، و در پایان اشکال پیش‌بینی ناشدنی شکستگی را موجب می‌شود. در واقع، آشوب مانع اساسی پیش‌بینی تعیین نحوه گسلش زمین‌لرزه شده است. به بیانی دیگر، این برهم‌کنش‌های پس‌خوردی هستند که در حین گسلش سبب افت و خیز مقدار تنش شده، نه تنها امکان پیش‌بینی نحوه گسلش را، بلکه احتمال پیش‌بینی اندازه زمین‌لرزه مورد انتظار را که در نتیجه زیر نظر قراردادن انباشت تنشیدگی برآورد شده است نیز غیرممکن می‌سازند (مانند زمین‌لرزه پارک فیلد در نیمه دوم اکتبر ۱۹۹۲). اگر تصور شود که واسطه‌های برهم‌کنش پیکربندی (Configuration interaction) نیز همان اختلال‌های کوچک‌اند، با توجه به اثر پروانه، توصیف سناریوی آشوب در گسلش در رابطه با گمان‌پردازی (Brune and Heaton 1992) مشمول حذف و اضافاتی محلی و غیرقابل پیش‌بینی در صحنه‌پردازی خواهد شد. وگرنه، با فرض فراگیرندگی برهم‌کنش‌های پس‌خوردی آشوبناک در فرآیندهای «شکستگی‌های پویا»، صحنه خودگردان آشوب به گویش آنان بهتر است بار دیگر در پایان و ارسا شود.

«زمین‌لرزه در آغاز به گونه جنبشی موج‌وار در طول گسله حرکت می‌کند و بدین سبب، فشاری که دو قطعه متقابل گسل را به هم نگاه داشته است کاهش می‌یابد. حتی در مواردی که مقدار تنش خیلی عظیم نیست، این تأثیر می‌تواند جنبش بزرگی در طرفین گسله ایجاد کند»

بدیهی است در نظریه بازگشت الاستیک (Reid 1991)، به هنگام و پس از گسیختگی برشی ناگهانی و رهاشدن انرژی تنشیدگی، به ترتیب جنبش در طول، و کاهش فشار در طرفین گسله ایجاد خواهد شد. اما سوای این فرآیند نهایی گسلش، جنبش و کاهش فشاری که در این نظرپردازی مطرح شده است می‌تواند در رابطه با نقطه بحرانی در نظر گرفته شود. چنانچه در توصیف پدیده‌های بحرانی به وجود یک



References

- Aki, K. 1981- , A Probabilistic synthesis of precursory phenomena. In: *Earthquake Prediction* (eds. Simpson, D. W., and Richards, P. G.), American Geophysical Union, Washington, D. C. 1981) pp. 566- 574.
- Alle'gre, C. 1987- Les fureurs de la terre, traduction par Darvich- zade, A., 1988, Tehran University Publications No. 1959, pp. 131- 134.
- Bolt, B. A., 1978- *Earthquakes: A Primer*, W. H. Freeman and company San Francisco, pp. 135- 154.
- Bown, W. 1992- Mathematicians learn how to tame chaos, New Scientist, 30 May 1992, 16. translated, in Iranian Journal of Physics. Vol. 10. No. 3, Autumn 1371.
- Clough, R. W. and, J. Penzien, 1974- Dynamics of Structures, translated in Farsi by Seadatpur, Isfahan Technical University. pp. 727- 736.
- Collins, E. R. and, R. A. Uhrhammer, 1987- Bulletin of the Seismographic Stations, Vol. 37, Nos. 1 and 2 pp. 1-98,
- Dresden, M., 1992- Chaos, A new scientific paradigm or science by public relations? The Physics Teacher, Jan, 1992, 30, 10.
- Efros, A. L., 1986- *Physics and Geometry of Disorder Percolation theory*, Mir Publishers, Moscow, 1986. translated by Mohammad Ghasem Vahidi Asl, 1371.
- Gutenberg, B., and C. F. Richter, 1944- Frequency of earthquakes in California, Bull. Seism. Soc. Am., 34, 185- 188.
- Habermann, R. E., W. R. Mc Cann, and, S. P. Nishenko, 1983- "A Gap is.," Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 73 No. 5, pp. 1485- 1486.
- Havskov, J., S. K., Singh, E., Nava, T., Dominguez, and M. Rodriguez, 1983- Playa Azul. Michoacan, Mexico, earthquake of 25 October 1981 ($M_s = 7.3$), Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 73, No. 2, pp. 449- 457.
- Hirabayashi, T., K., Ito and T. Yoshii, 1992- Multifractal Analysis of Earthquakes, Pageoph, Vol. 138, No. 4, pp. 591- 610.
- Housner, G. W. and, P. C. Jennings, 1982- Earthquake design criteria division of Engineering and applied science California Institute of Technology, Berkeley, California 94704.
- Huang, J. and D. L. Turcotte, 1992- Chaotic Seismic Faulting with a Mass- spring Model and Velocity- weakening Friction, Pageoph, Vol. 138, No. 4, pp. 569- 589.
- Ishimoto, M., and K. Iida, 1939- Observations sur les seisms euegistre par le microseismograph construite dernièrement (I) Bull. Earthq. Res. Inst., 17: 443- 478.
- Islami, A. A., 1974- A statistical study of the amplitude distribution of an earthquake swarm in western Iran. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 64, No. 5, pp. 1589- 1590.
- Kagan, Yan, Y. and David, D. Jackson, 1991- Seismic Gap Hypothesis: Ten Years After, J. Geophys. R. Vol 96, No B13. Pages 21, 419- 21, 431. December, 10, 1991.

- Kelleher, J. A., 1970- Space time seismicity of the Alaska- Aleutian seismic zone, J. Geophys. Res 75, 5745-5756.
- Kelleher, J., L. Sykes, and J. Oliver, 1973- Possible- Criteria for predicting earthquake locations and their implication to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean, J. Geophys. Res. 78, 2547- 2585.
- Kelleher, J., and J. Savino, 1975- Distribution of seismicity before large strike slip and thrust type earthquakes: J. Geophys. Res., Vol. 80, pp. 260- 271.
- Lomax, A. J., and R. A. Uhrhammer, R. A., 1984- Bulletin of the Seismographic Stations, Vol. 54, Nos. 1 and 2 pp. 1-88.
- Lomnitz, C., 1983, Reply to R. E. Habermann, W. R. Mc Cann, and S. P. Nishenko's "A gap is .." Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 73, No. 5, 1487- 1487.
- Mileti, D. S., J. R., Hutton, and J. H., Sorensen, 1981- *Earthquake Prediction Response and Options for Public Policy, Program and Technology, Environment and Man*, 147 p.
- Mogi, K., 1979- Two Kinds of Seismic gaps. Pure- Appl. Geophys. 117, 1172- 1186.
- Niazi, M., 1985- "Regression Analysis of Reported Earthquake Precursors, Presentation of Data." *Earthquake Prediction* edited by M. Shimazaki and W. Sturatt, Birkhauser, pp. 966- 981.
- Ohtake, M., T. Matomoto, and G., Latham, 1977a- Seismicity gap near Caxaca, southern Mexico as a probable precursor to a large earthquake, Pure Appl. Geophys. 115, 375.
- Ohtake, M., T. Matomoto, and G. Latham, 1977b- Temporal changes in seismicity preceding some shallow earthquakes in Mexico and central America Bull. Inter. Inst. of seismology and Earthquake Engineering 15, 105.
- Reid, H. F., 1911- The elastic- rebound theory of earthquakes. Bull. Dep. Geol. Univ. Calif. 6, 413- 44.
- Richter, C. F., 1958- *Elementary Seismology*, San- Francisco, W. H., Freeman,
- Rikitake, T., 1981- *Current Research in Earthquake Prediction I** Developments in Earth and Planetary Sciences, 1981, D. Reidel Publishing Co.
- Stix, G., 1992- Finding Fault, (Can Seismologists Predict earthquakes?), Scientific American, December, 1992.
- Sykes, L. R. and S. C., Jaume, 1990- Nature, 348, 595- 599.
- Wyss, M. and R. E. Habermann, 1979- Seismic- quiescence precursory to a past and future Kuriles-islands earthquake, Pure Appl. Geophys. 117, 1195- 1211.
- Zongjen, M., et. al, 1980 *Earthquake Prediction: Nine Major Earthquakes in China*, Seismological press.
- Zongjen, M. et al. 1988- Photo Album of 1976 Tangshan Earthquake Disaster Relief, North China Earthquake Sciences, Vol. 6. Supplement, pp. 1- 158.