

پیش بینی میان مدت زمین لرزه براساس کاف‌های لرزه‌ای در ایالت لرزه‌زمینساختی ایران مرکزی و شرق ایران

مهین اربابی^{۱*} و نوربخش میرزائی^۲

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۵۶۷، پذیرش نهایی: ۸۸۷۲۱)

چکیده

کاف‌های لرزه‌ای یکی از با اهمیت‌ترین پیش‌نشانگرها برای پیش‌بینی میان مدت زمین لرزه هستند. کاف‌های لرزه‌ای، قطعاتی از عناصر زمین‌ساختی (تکتوتیکی) هستند که در حال حاضر آرام‌اند ولی ممکن است در آینده موجب زمین‌لرزه‌های بزرگ شوند. کاف زمینه و کاف آماده‌سازی، چشمه‌های لرزه‌ای برای زمین‌لرزه‌های آینده هستند. در این تحقیق با بررسی توزیع زمان- مکان رومرکز زمین‌لرزه‌ها از ۱۹۶۳ تا ۲۰۰۶، الگوی کاف زمینه در شرق ایران تعیین شده است، که سه کاف آماده‌سازی در این کاف زمینه شکل گرفته است. رخدادهای سه زمین لرزه ۲۰۰۳/۱۲/۲۶ بم با بزرگی $M_s=6.8$ ، روی لبه کاف آماده‌سازی بم، زمین لرزه ۱۹۹۴/۲/۲۳ سفیدآبه با بزرگی $M_s=6.1$ ؛ روی لبه کاف آماده‌سازی سفیدآبه و زمین لرزه ۱۰ مه ۱۹۹۷ کریزان با بزرگی $M_s=7.0$ قابل پیش‌بینی بوده است. نمودارهای رهایی کرنش لرزه‌ای، نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌های خارج از کاف به درون آن و تعداد تجمعی زمین‌لرزه‌ها شکل‌گیری کاف مورد اشاره و رویداد زمین‌لرزه‌های بم، سفیدآبه و کریزان را تأیید می‌کند. علاوه بر این، خطر بالقوه زمین‌لرزه در کاف آماده‌سازی شکل گرفته در دشت‌بیاض که احتمالاً هنوز کرنش لرزه‌ای خود را تخلیه نکرده است وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی میان مدت، کاف زمینه، کاف آماده‌سازی، پیش‌نشانگر لرزه‌ای، الگوی لرزه‌خیزی، چشمه‌های لرزه‌ای

The intermediate-term earthquake prediction based on seismic gaps in Central-East Iran seismotectonic province

Arbabi, M.¹ and Mirzaei, N.²

M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 29 Aug 2006, Accepted: 13 Oct 2009)

Abstract

Seismic gaps as a method of earthquake prediction, initially, were used mainly for long-term prediction. Nowadays, seismic gaps are one of the most important precursory phenomena for intermediate-term earthquake prediction. These are part of the tectonic regions that are quiescent at the moment, but might cause damaging earthquakes in the future.

Based on the study of strong earthquakes in mainland of China it is suggested that intraplate gaps due to the activity of moderate and small earthquakes may be divided into "background gaps" and "preparation gaps". A background gap is a gap surrounded by larger earthquakes in a larger area and with a longer duration before the main shock. A preparation gap is a gap surrounded by small earthquakes in a smaller area and with a

shorter duration before the main shock (Lu and Song, 1989). Background gaps are of critical importance and are a clue to relatively high M_s earthquakes ($M_s > 5$). Preparation gaps build up in a region inside a background gap or its surroundings in a short time interval (a few years) before the main earthquake. The preparation gap is usually surrounded by small precursory earthquakes, even though one or few relatively large earthquakes (still smaller than the main earthquake) may occur in regions on the edge of the gap. Such smaller magnitude earthquake activity has been considered as premonitory phenomena useful for intermediate-term and even short-term earthquake prediction. Three criteria are proposed for the identification of these gaps (Lu and Song, 1989): (1) with the formation of a preparation gap the seismic strain release should accelerate both in the gap and in its vicinity, (2) the ratio of earthquake frequency outside the gap to that within it should reach a maximum value during the formation of the gap, and (3) some moderate earthquakes often occur in the forthcoming seismic source area before formation of the background gap. The former two are the main criteria for identification of the gap, and the third is a subsidiary criterion for determining the location of the forthcoming earthquake.

In this study, based on the history of earthquakes in the Central-East Iran seismotectonic province, we have found a background gap and three preparation gaps. One of these gaps is related to the destructive earthquake of $M_s = 6.8$, which occurred on 26 December 2003 in the Bam region of southern Central-East Iran. This earthquake occurred in the edge of the recognized preparation gap in the Bam region. The other gap is related to a large earthquake of $M_s = 6.0$, on 24 February 1994 in the Sefidabeh region of south-eastern Iran. This earthquake also occurred in the edge of the recognized preparation gap in the Sefidabeh region. The strain release curve, the ratio of the earthquake frequency outside the gap to that within it, and the cumulative number-time curve, have good correlation with the earthquakes happened. In addition, recognition of a preparation gap in the Dasht-e-Bayaz region, eastern Central-East Iran, implies accumulating seismic strain and a large earthquake may occur in that region in the future. The well-known Dasht-e-Bayaz and Abiz earthquake faults are located in this preparation gap.

Key words: Intermediate-term prediction, background gap, preparation gap, seismic precursory, seismicity pattern, potential earthquake sources

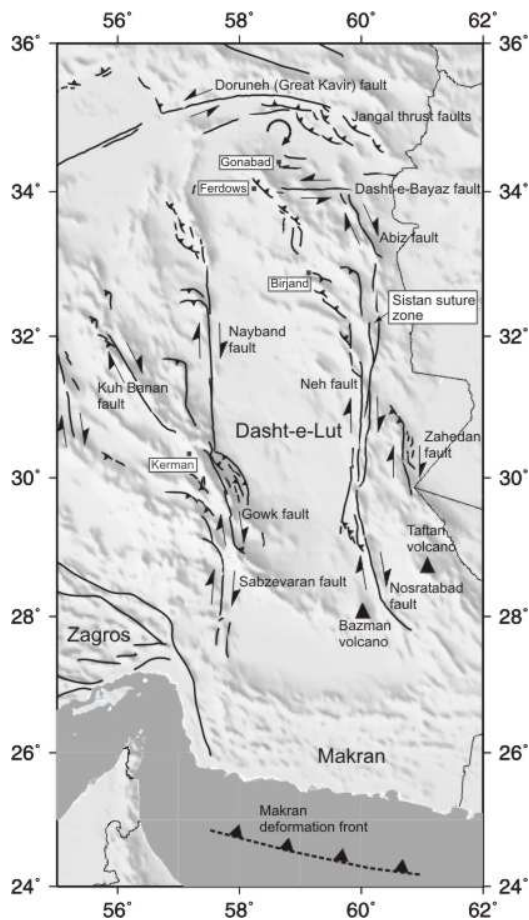
۱ مقدمه

می‌شود. بررسی الگوهای لرزه‌خیزی در چین، امکان پیش‌بینی زمین‌لرزه را در آنجا نشان داده است. این الگوها شامل: کاف‌های لرزه‌ای، کمربندهای لرزه‌ای، بی‌هنجاری لرزه‌ای (افزایش لرزه‌خیزی یا آرامش لرزه‌ای) و بی‌هنجاری مقدار b (b-value) است (جو، ۲۰۰۰). کاف‌های لرزه‌ای یکی از مهم‌ترین پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای، برای پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه به‌شمار می‌آیند. زمین‌لرزه‌های ۲۰ سال اخیر ایران (رودبار، ۱۹۹۰؛ سفیدآبه، ۱۹۹۴؛ آوج، ۲۰۰۲؛ بم، ۲۰۰۳؛ بلده، ۲۰۰۴؛

پیش‌بینی زمین‌لرزه عبارت است از تعیین محدوده بزرگی، ناحیه جغرافیایی و محدوده زمانی که در آن زمین‌لرزه‌ای در آینده رخ خواهد داد. یکی از راهکارهای تجربی پیش‌بینی زمین‌لرزه، روش بررسی پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای است. در روش بررسی پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای، بی‌هنجاری‌های توزیع مکان-زمان داده‌های لرزه‌زمین‌ساختی، زمین‌شناسی، زمین‌شیمیایی و ژئودتیک (geodetic) مورد بررسی قرار گرفته، براساس آنها امکان فعالیت لرزه‌ای و یا زمین‌لرزه‌های بزرگ آینده، پیش‌بینی

پس‌لرزه آن اول سپتامبر ۱۹۶۸ در فردوس با بزرگی $M_s = 6.5$ را تجربه کرده است. یکی از ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های این منطقه، وجود پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۶٫۰ آن است.

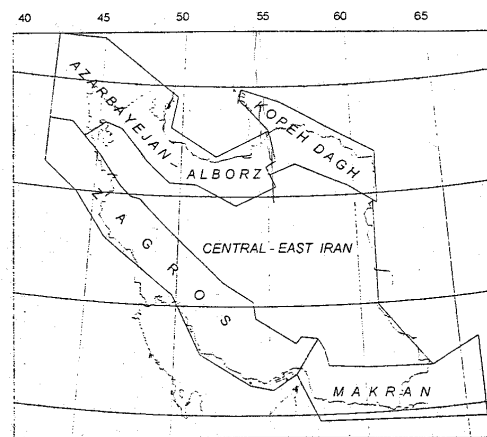
واکر و همکاران (۲۰۰۴)، برپایه اطلاعات ماهواره‌ای نتیجه‌گیری می‌کنند که گسل دشت بیاض، نسبتاً جوان است و در حین برون‌زد، چندین قطعه گسلی ردیف‌شده با هم ترکیب می‌شوند. این قطعات ردیف‌شده قسمتی از توزیع جمعیتی گسل‌های گناباد، محمدآباد و نیازآباد هستند (شکل ۲). این منطقه تا قبل از زمین‌لرزه طبس، به منزله منطقه فعال از نظر لرزه‌خیزی شناخته نمی‌شد.



شکل ۲. نقشه گسل‌های شرق ایران (واکر و همکاران، ۲۰۰۴).

در این تحقیق با توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها در ایران مرکزی و شرق ایران، کاف زمینه‌ای در محدوده

زرند، ۲۰۰۵ و دورود، ۲۰۰۶ که غالباً روی لبه کاف‌ها رخ داده‌اند، با نظریه کاف‌های لرزه‌ای سازگاری دارند. ایالت ایران مرکزی و شرق ایران، براساس تقسیم‌بندی میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) (شکل ۱) با یک رشته از گسل‌های فعال شمال تبریز، ایپک، و تروند در شمال از البرز- آذربایجان جدا شده است. از شرق نیز با گسل شمالی- جنوبی هریرود از بلوک هلمند جدا می‌شود. در جنوب این منطقه مکران با فرونشست جازموریان و از غرب تا جنوب غربی با گسل اصلی معکوس زاگرس از ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس جدا می‌شود.



شکل ۱. ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی اصلی ایران (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸).

این ایالت زمین‌لرزه‌های بزرگی از جمله زمین‌لرزه‌های ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ بم با بزرگی $M_s = 6.8$ ؛ ۲۲ فوریه ۲۰۰۵ زرند با بزرگی $M_s = 6.5$ ؛ ۱۰ مه ۱۹۹۷ کریمان با بزرگی $M_s = 7.0$ ؛ ۲۳ فوریه ۱۹۹۴ سفیدآبه با بزرگی $M_s = 6.1$ ؛ و پس‌لرزه آن در ۲۴ فوریه ۱۹۹۴ با بزرگی $M_s = 6.0$ ؛ ۱۴ نوامبر ۱۹۷۹ آبیژ با بزرگی $M_s = 6.7$ ؛ ۱۶ ژانویه ۱۹۷۹ قائن با بزرگی $M_s = 6.7$ ؛ ۱۶ سپتامبر ۱۹۷۸ طبس با بزرگی $M_s = 7.4$ ؛ ۲۷ نوامبر ۱۹۷۹ کولی- بیناباد با بزرگی $M_s = 7.3$ ؛ ۷ دسامبر ۱۹۷۹، آبیژ با بزرگی $M_s = 6.1$ و $M_s = 7.3$ ؛ ۳۱ اوت ۱۹۶۸ دشت بیاض با بزرگی $M_s = 7.3$ و

کاف دوم کاف آماده‌سازی یا از کافی است که با زمین‌لرزه‌های کوچک ($3 < M_s < 5$) در سطوح کوچک‌تر از کاف زمینه احاطه شده است و در بازه زمانی نسبتاً کوتاه (چند سال) قبل از شوک اصلی شکل می‌گیرد. علاوه بر این، در بازه زمانی پیش‌گفته، یک یا گروهی از زمین‌لرزه‌های نسبتاً برجسته (کوچک‌تر از زمین‌لرزه اصلی) ممکن است روی لبه کاف آماده‌سازی روی دهد. وجود این زمین‌لرزه‌ها که "زمین‌لرزه‌های قریب‌الوقوع (imminant)" نامیده می‌شوند، کاف آماده‌سازی را مشخص می‌کند. لو و همکاران (۱۹۸۹)، در کشور چین سه معیار برای شناسایی این کاف‌ها به دست آورده‌اند: (۱) با شکل‌گیری کاف، رهایی کرنش لرزه‌ای در درون و نواحی مجاور آن شتاب می‌گیرد، به طوری که میزان بی‌هنجاری در زمان شکل‌گیری کاف بیش از سه برابر میزان تغییرات آن در دو سال قبل از شکل‌گیری کاف است؛ (۲) در حین شکل‌گیری کاف نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌های خارج از کاف به فراوانی زمین‌لرزه‌های درون آن به بیشینه مقدار خود می‌رسد، به گونه‌ای که حداقل برای مدت شش ماه، این نسبت بیشتر از سه برابر دو سال قبل از شکل‌گیری کاف خواهد بود؛ (۳) غالباً، برخی زمین‌لرزه‌های متوسط نزدیک چشمه لرزه‌ای قبل از شکل‌گیری کاف زمینه روی می‌دهند. معیارهای اول و دوم برای شناسایی کاف آماده‌سازی، و معیار سوم معیار کمکی برای تعیین مکان زمین‌لرزه بعدی است.

بزرگی زمین‌لرزه‌ها برحسب رابطه بین ابعاد کاف و مدت زمان شکل‌گیری کاف مطابق روابط زیر برآورد می‌شود (لو و همکاران، ۱۹۸۳):

$$M_s = 3.69 \log L - 1.71 \pm 0.47 \quad (1)$$

$$M_s = 1.34 \log T + 4.57 \pm 0.48 \quad (2)$$

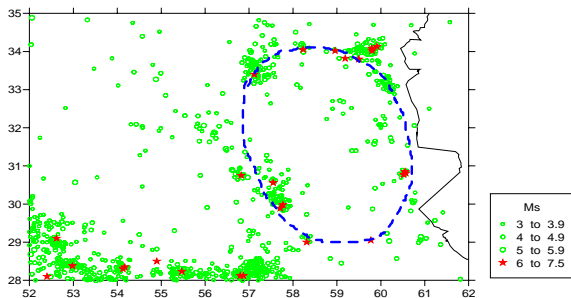
که در آن‌ها L طول محور اصلی کاف برحسب کیلومتر و

جغرافیایی ۵۷ تا ۶۱ درجه طول شرقی و ۲۹ تا ۳۴ درجه عرض شمالی در شرق ایران شناسایی شد که منطبق بر بلوک لوت (دشت لوت) است که سه کاف آماده‌سازی درون آن شکل گرفته است. این کاف‌ها به ترتیب در محدوده جغرافیایی ۵۴ تا ۵۷ درجه طول شرقی و ۲۹ تا ۳۲ درجه عرض شمالی، ۵۷/۵ تا ۶۱ درجه طول شرقی و ۲۹/۵ تا ۳۲/۵ درجه عرض شمالی و ۵۷ تا ۶۰ درجه طول شرقی و ۳۲/۵ تا ۳۵ درجه عرض شمالی واقع شده‌اند.

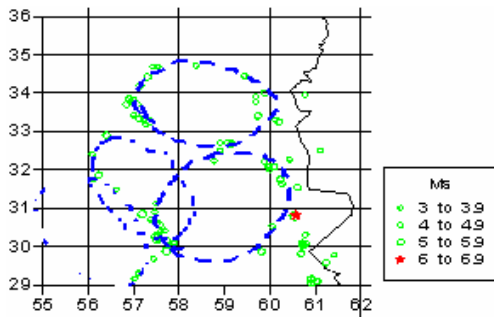
۲ کاف‌های لرزه‌ای

کاف‌های لرزه‌ای، قطعاتی از عناصر زمین‌ساختی هستند که در حال حاضر آرام‌اند ولی ممکن است در آینده موجب زمین‌لرزه‌های بزرگ شوند (آمبرسیز، ۱۹۸۸). براساس نظریه کاف‌های لرزه‌ای، مناطق فعالی که برای مدتی آرامش لرزه‌ای دارند، احتمالاً در مرحله تجمع کرنش لرزه‌ای {میان‌لرزه‌ای (interseismic)} از چرخه زمین‌لرزه قرار دارند. به عبارتی این مناطق دارای پتانسیل برای زمین‌لرزه‌های آینده هستند. تلاش ابتدایی استفاده از مفهوم کاف لرزه‌ای، برای برآورد زمین‌لرزه‌های بزرگ آینده از سوی ایمامورا قبل از زمین‌لرزه مخرب ۱۹۲۳ توکیو صورت گرفت (لو، ۱۹۸۸). دو نوع کاف لرزه‌ای تعریف شده است. یکی کاف زمینه و آن کافی است که با زمین‌لرزه‌های نسبتاً بزرگ ($M_s > 5$) در گستره‌ای وسیع احاطه شده و در بازه زمانی نسبتاً طولانی (چند ده سال) قبل از شوک اصلی شکل می‌گیرد. شناسایی کاف‌های زمینه از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا پیش‌بینی براساس آن خود عامل مهمی در تعقیب رفتار لرزه‌خیزی و بررسی الگوهای پیش‌نشانگری است، که می‌تواند منجر به افزایش قطعیت پیش‌بینی به‌خصوص از نظر زمانی شود. یک کاف زمینه در محدوده‌ای تشکیل می‌شود که انباشت تنش در آن قسمت و اطراف آن صورت می‌گیرد. این کاف‌ها، غالباً، حاوی کاف‌های نوع دوم هستند.

زمین‌لرزه‌ها در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی در بازه‌های زمانی متفاوت برای زمین‌لرزه‌ها با بزرگی $M_s \geq 3.0$ رسم و محدوده‌های کاف‌های آماده‌سازی در آنها شناسایی شده است (شکل ۴). کاف آماده‌سازی، معمولاً در یک چهارچوب مستطیلی شکل قرار می‌گیرد، که طول و عرض آن به ترتیب دو برابر محور اصلی (قطر بزرگ بیضی) کاف و دو برابر محور فرعی (قطر کوچک بیضی) کاف است (لو و همکاران، ۱۹۸۳).



شکل ۳. لرزه‌خیزی ایران مرکزی و شرق ایران از ۱۹۶۳ تا ژوئن ۲۰۰۶ برای $M_s \leq 7/4$ و تشکیل کاف زمینه (کاف با خط چین آبی برای زمین‌لرزه‌های $M_s \geq 6/0$ نشان داده شده است).



شکل ۴. توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها بعد از ۱۹۸۰ و تشکیل سه کاف آماده‌سازی در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران.

۱-۳ کاف آماده‌سازی بهم

توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها از ۱۹۹۰ تا قبل از زمین‌لرزه مخرب ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ در شهر تاریخی بهم، با بزرگی $M_s = 6.8$ ، شکل‌گیری کاف آماده‌سازی را در جنوب غربی کاف زمینه نشان می‌دهد. این زمین‌لرزه روی لبه کاف آماده‌سازی بهم، که در جنوب شرقی کاف واقع شده، رخ داده است (شکل ۵). مراحل شکل‌گیری این

T زمان شکل‌گیری کاف برحسب ماه است.

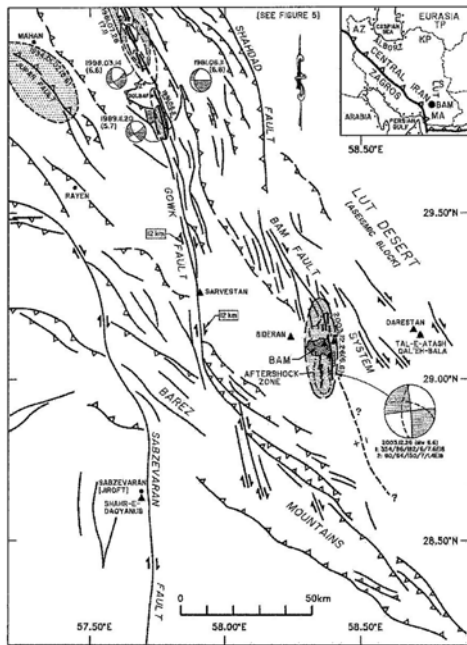
۳ شناسایی کاف‌های لرزه‌ای در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران

فهرست‌نامه‌ای شامل زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگامی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران، در محدوده جغرافیایی ۵۲ تا ۶۲ درجه طول شرقی و ۲۸ تا ۳۵ درجه عرض شمالی، از سال ۱۹۶۳ تا ۲۰۰۱ از فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌های ایران (میرزایی و همکاران، ۱۳۸۱) و از ۲۰۰۱ تا ژوئن ۲۰۰۶، از پایگاه داده‌های جهانی USGS استخراج شده است. بین رومرکز تعیین شده برای زمین‌لرزه‌ها توسط ISC و USGS/NEIC، که معتبرترین مراکز برای تعیین پارامترهای زمین‌لرزه هستند، اختلاف قابل توجهی وجود دارد. میرزایی و همکاران (۱۹۹۷) روشن ساختند که در این دوره زمانی برای رومرکز زمین‌لرزه‌های با بزرگی $M_s \geq 6.0$ و $M_s \geq 6.0$ به‌طور متوسط به ترتیب عدم قطعیت ۱۰ و ۱۵ کیلومتر وجود دارد، بدیهی است که این میزان خطا برای زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر، به مراتب بیشتر است. برای ۸۰ درصد زمین‌لرزه‌های ایران که پس از استقرار شبکه لرزه‌نگاری استاندارد جهانی در ۱۹۶۳ به ثبت رسیده‌اند، تنها بزرگی امواج درونی m_b گزارش شده است. از رابطه (۳) که میرزایی و همکاران (۱۳۸۱) برای منطقه زاگرس پیشنهاد کرده‌اند، مقیاس m_b برای زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی $6.2 \leq m_b \leq 6.9$ به M_s تبدیل شده است.

$$M_s = 2/0 \cdot m_b - 5/28 \quad (3)$$

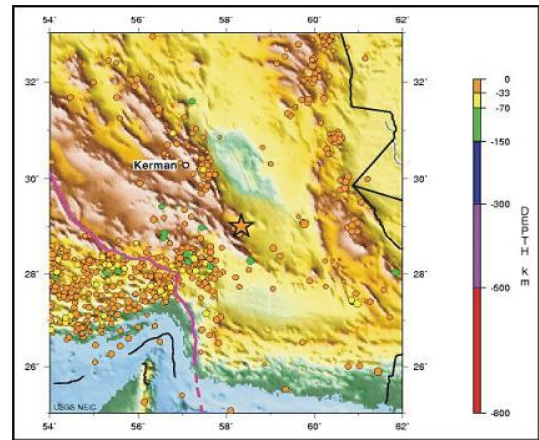
در این تحقیق نقشه توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران را در ۱۰۰ سال اخیر برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی $M_s \geq 3.0$ رسم و محدوده کاف زمینه برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی $M_s \geq 6.0$ ، شناسایی شده است (شکل ۳). برای تعیین محدوده کاف‌های آماده‌سازی نقشه توزیع رومرکز

دسامبر ۲۰۰۳ بم با بزرگی $M_s = 6/8$ (الف) از ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۶
 (ب) از ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ (ج) از ژوئن ۱۹۹۶ تا ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳.
 این کاف گسل‌های بم و گوک را در بر گرفته است
 (شکل ۷). الگوی کاف در اوایل سال ۱۹۹۰ شروع به
 شکل‌گیری کرده و به تدریج تا ۲۰۰۳ کامل‌تر شده است.
 شکل ۶ در سه پنجره زمانی الگوی لرزه‌خیزی منطقه را
 نشان می‌دهد. در شکل ۶ الف، طرح اولیه کاف دیده
 می‌شود. در شکل ۶ ب، توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها را در
 طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ نشان می‌دهد، که فعالیت
 لرزه‌خیزی روی مرزهای کاف متمرکز بوده و محیط
 درون کاف از رومرکز زمین‌لرزه خالی است. بیشترین
 فعالیت لرزه‌خیزی در انتهای جنوب شرقی محور اصلی و
 شرق محور فرعی کاف متمرکز است. احتمالاً، این امر
 نشان‌دهنده این است که، کل محدوده کاف تحت تنش
 بوده، و مقاومت قسمت‌های پیش‌گفته، با شکستگی‌های
 کوچک در حال کاهش است. سرانجام زمین‌لرزه بم، در
 ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ با بزرگی $M_s = 6/8$ ، بین دو نقطه یاد
 شده به وقوع می‌پیوندد.

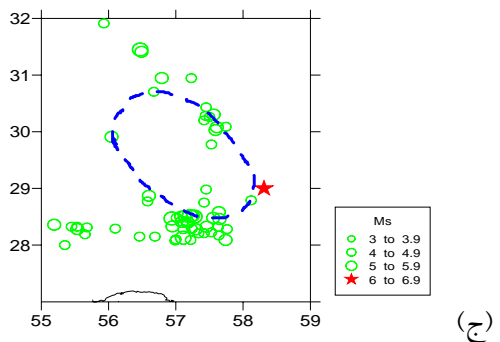
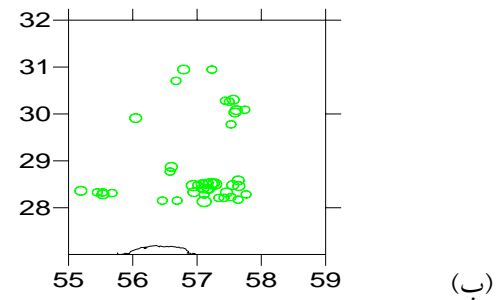
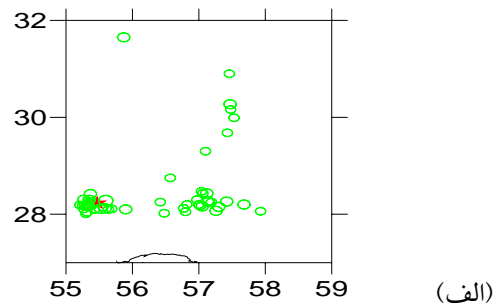


شکل ۷. نقشه بخش جنوبی سامانه گسلی گوک و گسل بم در غرب بلوک لوت (بربریان، ۲۰۰۵).

کاف آماده‌سازی، در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. رومرکز زمین‌لرزه‌های جنوب ایران از ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۳، زمین‌لرزه ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳، بم، با ستاره مشخص شده است (مرکز اطلاعات بین‌المللی USGS).



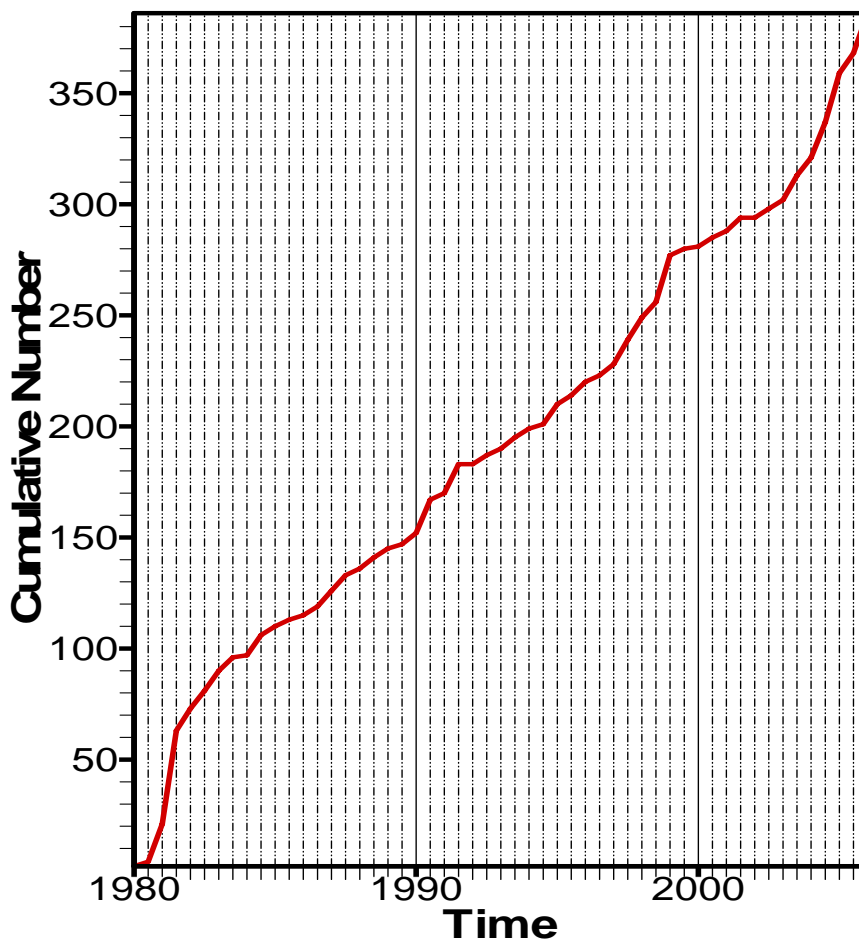
شکل ۶. مراحل شکل‌گیری کاف آماده‌سازی قبل از زمین‌لرزه ۲۶

و ۲ بزرگی زمین‌لرزه به ترتیب $M_s = 7.0 \pm 0.47$ و 0.48 به خوبی درون این محدوده بزرگی قرار می‌گیرد. در حین شکل‌گیری کاف، رابطه بین کرنش لرزه‌ای آزاد شده در کاف و نواحی مجاور آن ($\sum \sqrt{E}$)، و طول کاف (L)، محور اصلی، از رابطه زیر به دست می‌آید (لو و همکاران، ۱۹۸۳):

$$\sum \sqrt{E} \times 10^9 \text{ erg}^{1/2} = 0.11L - 12.6 \quad (4)$$

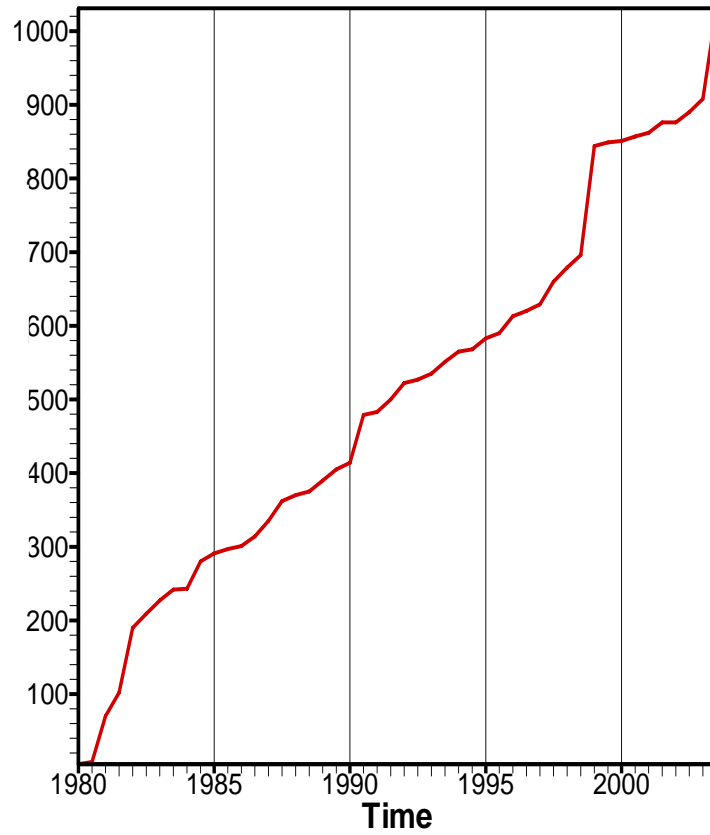
طول محور اصلی کاف $L = 244 \text{ km}$ است، بنابراین، کرنش لرزه‌ای در کاف و نواحی مجاور آن، $10^9 \times 14/24$ به دست می‌آید.

طبق معیارهای شناسایی کاف آماده‌سازی، شیب نمودار تعداد تجمعی زمین‌لرزه‌ها (شکل ۸)، در ۱۹۹۰ افزایش نسبتاً تیزی را نشان می‌دهد، که این می‌تواند دلیلی برای شروع شکل‌گیری کاف آماده‌سازی در این منطقه باشد. دقیقاً، همین بی‌هنجاری، در سال‌های ۱۹۹۰ در نمودار شکل ۹، که نرخ رهایی کرنش لرزه‌ای در منطقه را نشان می‌دهد، مشخص است. بی‌هنجاری در نمودار نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌های خارج از کاف به درون آن، اندکی متفاوت با دو نمودار قبلی است (شکل ۱۰) این نمودار به خوبی دو نمودار قبلی شرط تشکیل کاف آماده‌سازی را برآورده نمی‌کند. طول محور اصلی کاف ۲۴۴ کیلومتر، و زمان شکل‌گیری آن، ۱۶۸ ماه است. با توجه به روابط (۱)

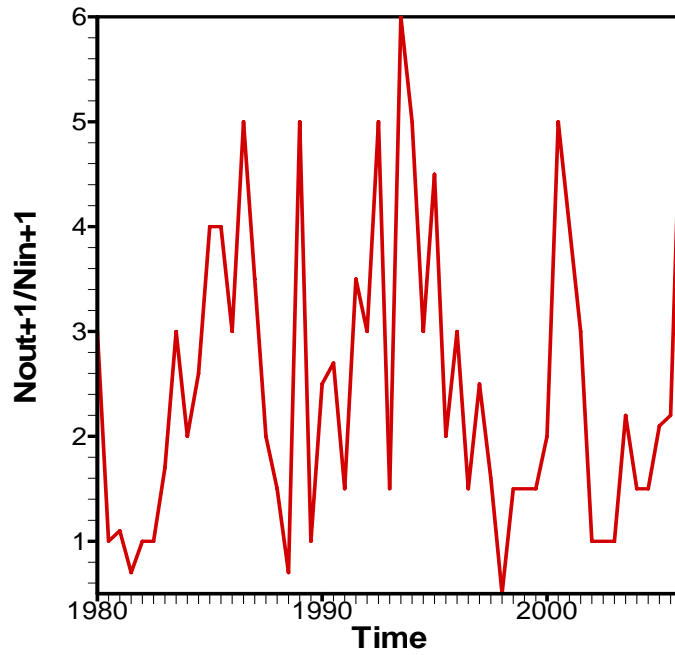


شکل ۹. نمودار تعداد تجمعی زمین‌لرزه‌ها در کاف آماده‌سازی بم.

$$\Sigma \sqrt{E} \times 10^9 \text{ erg}^{1/2}$$



شکل ۹. نمودار رهایی کرنش لرزه‌ای در کاف آماده‌سازی بم.



شکل ۱۰. نمودار نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌های خارج از کاف به درون آن، در کاف لرزه‌ای بم در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران.

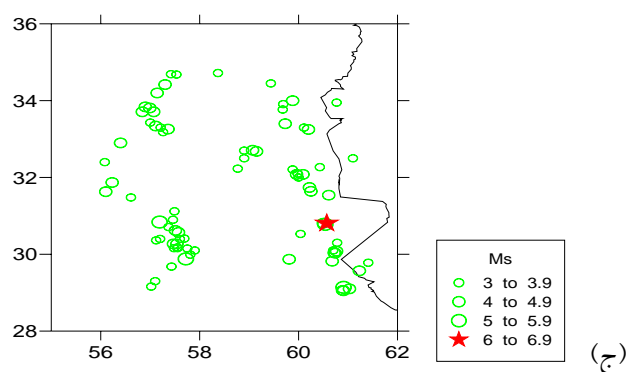
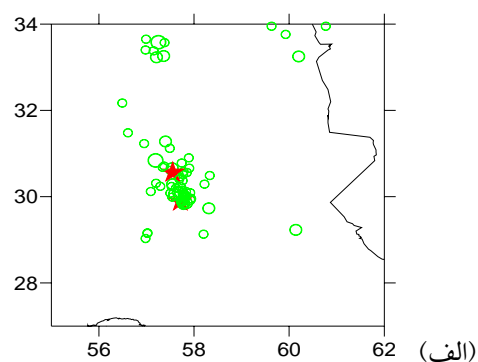
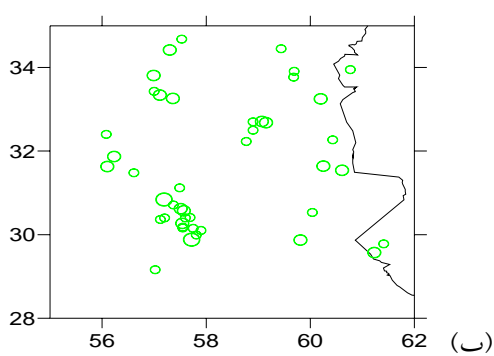
۲-۳ کاف آماده‌سازی سفیدآبه

این کاف روی مرز جنوبی کاف زمینه قرار گرفته و چندین زمین‌لرزه بزرگ را تجربه کرده است. مراحل شکل‌گیری کاف آماده‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. کاف از ۱۹۸۳ شروع به شکل‌گیری کرده و در ۲۳ فوریه ۱۹۹۴، زمین‌لرزه سفیدآبه با بزرگی $M_s = 6.0$ و پس‌لرزه ۲۴ مه ۱۹۹۴، با بزرگی $M_s = 6.0$ کامل شده است. نمودار تعداد تجمعی زمین‌لرزه‌ها (شکل ۱۳) و نمودار فراوانی زمین‌لرزه خارج کاف به درون آن (شکل ۱۴) بی‌هنجاری‌هایی را در ۱۹۸۳، ۱۹۸۶، ۱۹۹۱، ۱۹۹۴، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹ نشان می‌دهد، که به نظر می‌رسد به علت تحت‌تأثیر بودن کاف، از کاف مجاور آن (کاف آماده‌سازی بم) باشد.

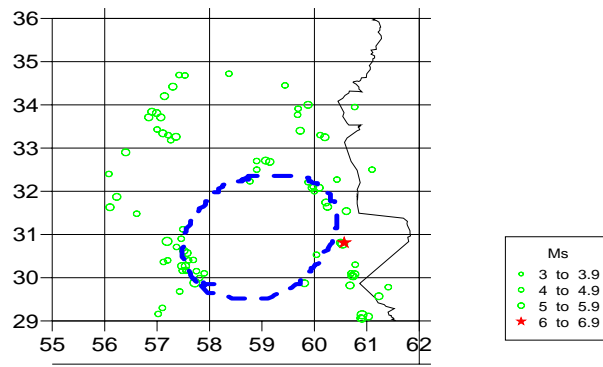
طول محور اصلی کاف آماده‌سازی سفیدآبه، برابر ۳۱۰ کیلومتر و زمان شکل‌گیری آن، ۱۳۲ ماه است که

با استفاده از روابط ۱ و ۲ به ترتیب، مقادیر بزرگی زمین‌لرزه $M_s = 7.41 \pm 0.48$ و $M_s = 7.48 \pm 0.47$ به دست می‌آید. در این منطقه در دو روز پیاپی، دو زمین‌لرزه در ۲۳ فوریه ۱۹۹۴ با $M_s = 6.1$ و در ۲۴ فوریه ۱۹۹۴ با بزرگی $M_s = 6.0$ ، به وقوع پیوست. احتمال دارد، تفاوت مقادیر محاسبه شده با آنچه رخ داده است، ممکن است به علت تقسیم انرژی میان این دو واقعه باشد.

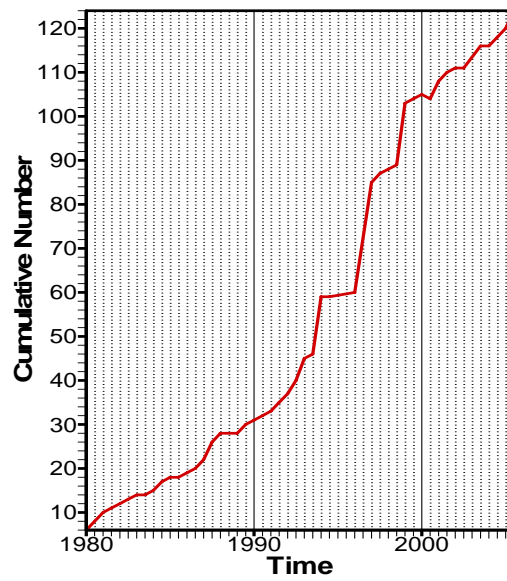
کاف بعد از زمین‌لرزه سفیدآبه، همچنان الگوی خود را حفظ کرده است (شکل ۱۶). این منطقه غیر از ۱۹۹۴، زمین‌لرزه‌های ۴ اوت ۲۰۰۳، با بزرگی $M_s = 5.9$ ؛ ۲۱ اوت ۲۰۰۳، با بزرگی $M_s = 6.5$ و ۱۴ فوریه ۲۰۰۵، با بزرگی $M_s = 5.7$ را تجربه کرده است. این امر ممکن است، به علت کاف مجزای تشکیل شده بعد از کاف اولیه باشد؛ یا اینکه زمین‌لرزه ۲۳ فوریه ۱۹۹۴ از جمله زمین‌لرزه‌های تخلیه‌گر در این منطقه باشد.



شکل ۱۱. نقشه توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران: الف) از ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۵، ب) از ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۰، ج) از ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۴.

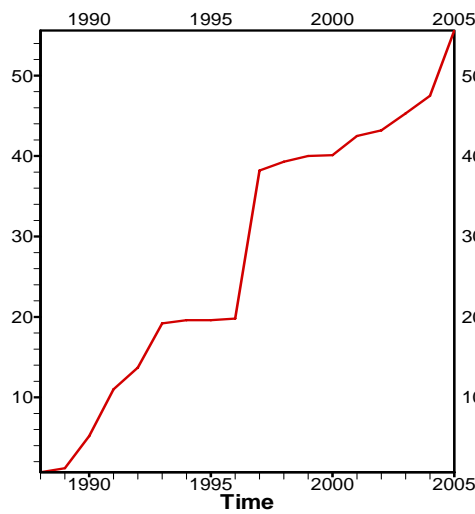


شکل ۱۲. شکل گیری کاف آماده سازی در سفیدآبه در ایالت لرزه زمین ساختی ایران مرکزی و شرق ایران از ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۴.

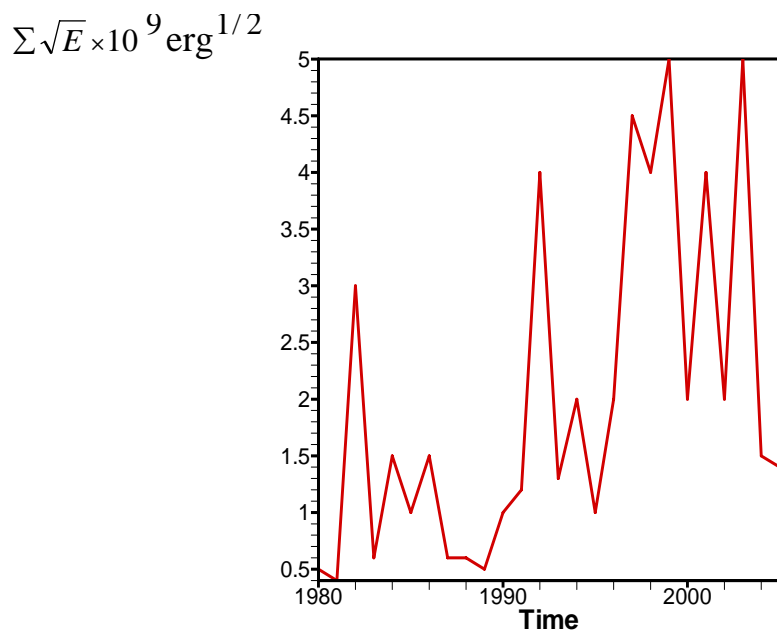


شکل ۱۳. نمودار تعداد تجمعی زمین لرزه ها در کاف آماده سازی سفیدآبه.

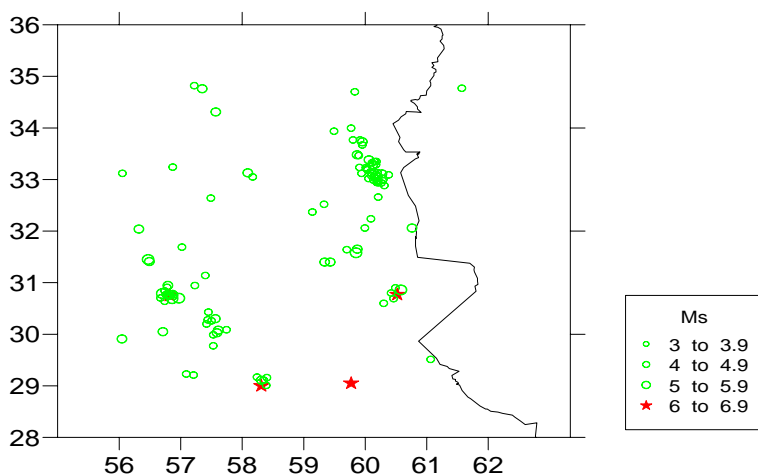
$N_{out} + 1 / N_{in} + 1$



شکل ۱۴. نمودار فراوانی زمین لرزه های خارج از کاف به درون آن، در کاف آماده سازی سفیدآبه.



شکل ۱۵. نمودار نرخ کرنش لرزه‌ای کاف آماده‌سازی دشت بیاض در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران.



شکل ۱۶. نقشه توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها از ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۶ در کاف آماده‌سازی سفیدآبه.

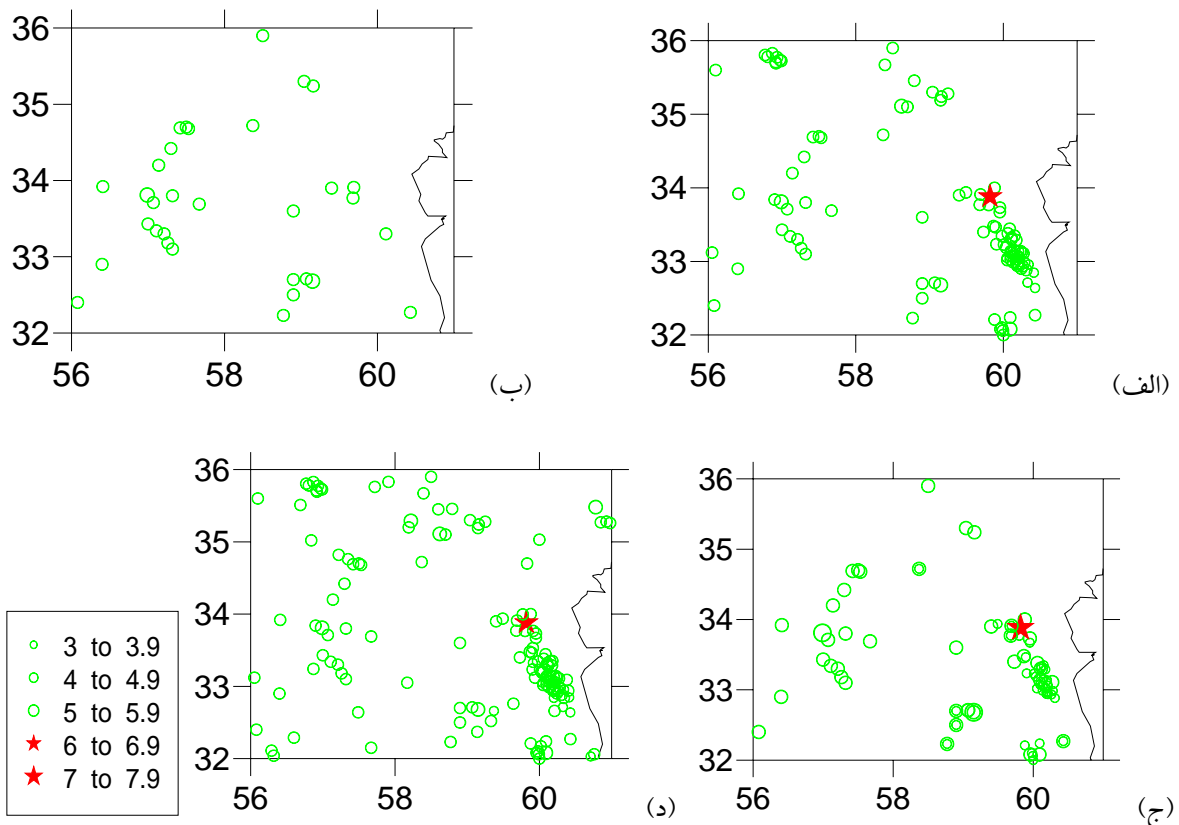
۳-۳ کاف آماده‌سازی دشت بیاض
 این کاف که منطبق بر گسل‌های دشت بیاض، آبیض و کریزان است در محدوده جغرافیایی طول ۵۷ تا ۶۰ درجه و عرض ۳۲/۵ تا ۳۵ درجه قرار دارد. در این ناحیه زمین‌لرزه‌های بزرگی از جمله: زمین‌لرزه ۱۴ دسامبر ۱۹۷۹، آبیض، با بزرگی $M_s=6.7$ ؛ ۱۶ ژانویه ۱۹۷۹، قائن با بزرگی $M_s=6.7$ ؛ سپتامبر ۱۹۷۸، طبس با بزرگی $M_s=7.4$ ؛ ۲۷ نوامبر ۱۹۷۹، دشت بیاض با بزرگی $M_s=7.3$ ؛ ۷ دسامبر ۱۹۷۹، آبیض با بزرگی $M_s=6.1$ ؛ ۳۱ اوت ۱۹۶۸، دشت بیاض با بزرگی $M_s=7.5$ و پس‌لرزه آن در اول سپتامبر ۱۹۶۸، فردوس با بزرگی $M_s=6.5$ و ۱۰ مه ۱۹۹۷ کریزان با بزرگی $M_s=7.0$ رخ داده است بررسی این ناحیه را به‌دلیل کاف واضحی که به‌خوبی شرایط کاف آماده‌سازی (لو و همکاران، ۱۹۸۳)، را تأمین

۳-۳ کاف آماده‌سازی دشت بیاض
 این کاف که منطبق بر گسل‌های دشت بیاض، آبیض و کریزان است در محدوده جغرافیایی طول ۵۷ تا ۶۰ درجه و عرض ۳۲/۵ تا ۳۵ درجه قرار دارد. در این ناحیه زمین‌لرزه‌های بزرگی از جمله: زمین‌لرزه ۱۴ دسامبر ۱۹۷۹، آبیض، با بزرگی $M_s=6.7$ ؛ ۱۶ ژانویه ۱۹۷۹، قائن با بزرگی $M_s=6.7$ ؛ سپتامبر ۱۹۷۸، طبس با بزرگی $M_s=7.4$ ؛ ۲۷ نوامبر ۱۹۷۹، دشت بیاض با بزرگی $M_s=7.3$ ؛ ۷ دسامبر ۱۹۷۹، آبیض با بزرگی $M_s=6.1$ ؛ ۳۱ اوت ۱۹۶۸، دشت بیاض با بزرگی $M_s=7.5$ و پس‌لرزه آن در اول سپتامبر ۱۹۶۸، فردوس با بزرگی $M_s=6.5$ و ۱۰ مه ۱۹۹۷ کریزان با بزرگی $M_s=7.0$ رخ داده است بررسی این ناحیه را به‌دلیل کاف واضحی که به‌خوبی شرایط کاف آماده‌سازی (لو و همکاران، ۱۹۸۳)، را تأمین

زمین‌لرزه قریب الوقوع، در روی محور اصلی یا در دو انتهای محور اصلی آن باشیم (شکل ۱۸). نمودار نرخ کرنش لرزه‌ای (شکل ۱۹) در عین یکنواختی که دارد، یک بی‌هنجاری را در اواسط ۱۹۹۰ با افزایش شیب، نشان می‌دهد. این بی‌هنجاری با شکل‌گیری کاف در ۱۹۹۰، توافق خوبی دارد. همین بی‌هنجاری‌ها را در نمودار، نسبت فراوانی زمین‌لرزه خارج از کاف به درون آن و نمودار نرخ کرنش لرزه‌ای مشاهده می‌کنیم (شکل ۱۹ و شکل ۱۹). هر سه نمودار با توافق خوبی بی‌هنجاری را در ۱۹۹۰ نشان می‌دهند و آنچه که در فهرست‌نامه زمین‌لرزه، تا قبل از زمین‌لرزه کریزان در این سال‌ها می‌بینیم وقوع زمین‌لرزه‌های فراوان است، که بزرگی آنها از ۴/۷ تجاوز نمی‌کند.

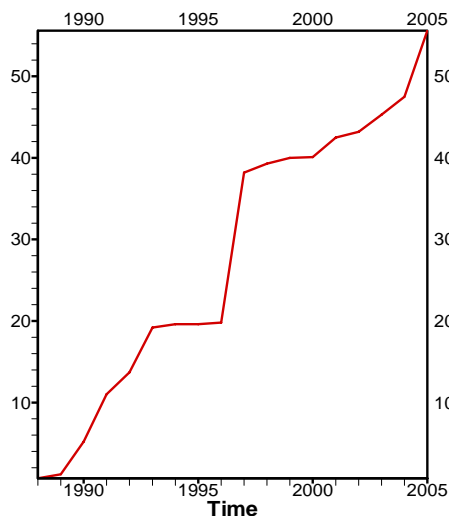
می‌کند مورد بررسی قرار می‌دهیم.

زمین‌لرزه‌های بزرگ، غالباً روی محور اصلی یا در دو انتهای شمال‌غربی و جنوب‌شرقی، محور اصلی کاف آماده‌سازی رخ داده‌اند. محدوده کاف تحت تأثیر گسل‌های جوان و امتداد لغز (والکر و همکاران، ۲۰۰۴)، دشت بیاض و گسل فردوس، قرار دارند (شکل ۲). شکل ۱۶ الف رومرکز زمین‌لرزه‌ها در محدوده کاف را چند سال قبل از تشکیل آن نشان می‌دهد. الگوی کاف در نقشه شکل ۱۶ ب شکل گرفته، و در شکل ۱۶ د طرح آن کامل گشته است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، زمین‌لرزه‌ها بیشتر در دو انتهای محور اصلی کاف متمرکزند. متعاقب شکل‌گیری این کاف، باید منتظر یک

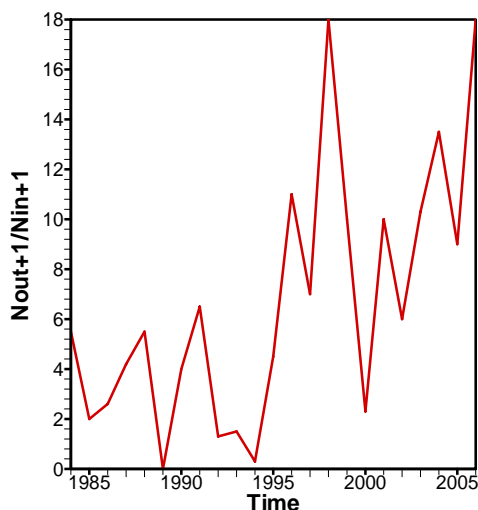


شکل ۱۶. نقشه رومرکز زمین‌لرزه‌ها در کاف آماده‌سازی دشت بیاض و نحوه شکل‌گیری کاف: الف) از ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۲، ب) ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۸، ج) از ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۶، د) از ۲۰۰۶ تا ۱۹۸۵.

$$\Sigma \sqrt{E} \times 10^9 \text{ erg}^{1/2}$$



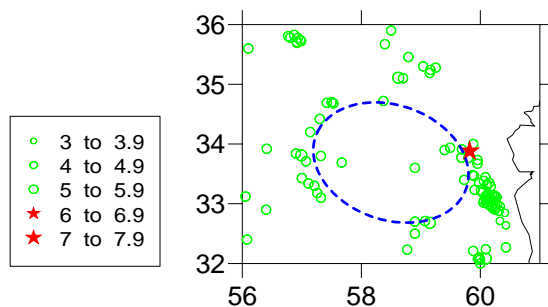
شکل ۱۹. نمودار نرخ کرنش لرزه‌ای کاف آماده‌سازی دشت بیاض.



شکل ۲۰. نمودار نسبت فراوانی زمین‌لرزه‌های خارج از کاف به درون آن در کاف آماده‌سازی دشت بیاض در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران.

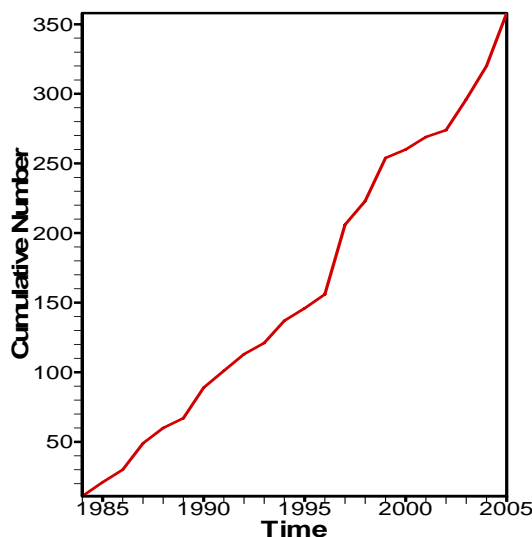
۴ نتیجه‌گیری

در بررسی توزیع زمانی و مکانی رومرکز زمین‌لرزه‌ها در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران یک کاف زمینه در محدوده جغرافیایی ۵۷ تا ۶۱ درجه طول شرقی و ۲۷ تا ۳۴ درجه عرض شمالی مشتمل بر دشت لوت شناسایی شد که سه کاف آماده‌سازی درون آن



شکل ۱۷. نقشه توزیع رومرکز زمین‌لرزه‌ها و شکل‌گیری کاف آماده‌سازی دشت بیاض.

شکل ۱۷ نقشه محدوده کاف آماده‌سازی را نشان می‌دهد. محور اصلی کاف ۲۸۸ کیلومتر، و اگر زمان شکل‌گیری آن تا حال حدود ۷ سال در نظر بگیریم، بزرگی زمین‌لرزه از روابط ۱ و ۲ به ترتیب معادل ± 0.47 $M_s = 7/3$ و $M_s = 7/1 \pm 0.48$ به دست می‌آید. این بزرگی به‌خوبی در محدوده بزرگی زمین‌لرزه کریزان با بزرگی $M_s = 7/0$ قرار می‌گیرد. کاف همچنان شکل خود را حفظ کرده است و با توجه به آرامش لرزه‌ای که در نمودارهای دو شکل ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود می‌توان منتظر زمین‌لرزه‌هایی ویرانگر در آینده باشیم.



شکل ۱۸. نمودار تعداد تجمعی زمین‌لرزه‌ها در کاف آماده‌سازی دشت بیاض.

اختیار بودن داده‌های با مکان‌یابی بهتر) که لازمه آن وجود شبکه‌های لرزه‌نگاری متراکم و پوشش ایستگاهی مناسب است، می‌توان بر مبنای نظریه کاف لرزه‌ای به نتایج مطمئن‌تری نائل آمد.

منابع

میرزائی، ن.، قیطانچی، م.، ناصریه، س.، رئیسی، م.، ظریفی، ز. و طبائی، ق.، ۱۳۸۱. پارامترهای مبنایی

زمین‌لرزه‌های ایران، انتشارات دانش‌نگار، ۱۸۱ ص.

Ambraseys, N. N., 1988, Engineering seismology. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **17**, 1-105.

Berberian, M., 2005, The 2003 Bam urban earthquake. A predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut Block, Southern Iran, *Earthquake spectra*, **21**, No. S 1, 535-599.

Lu, Y. and Juango, S., 1989, Practical application of preparation gaps for intermediate-term earthquake prediction. *Tectonophysics*, **167**: 319-328.

Lu, Y., Jianwen, Sh. and Wei, W., 1983, Seismic gaps and imminent earthquake (continued). *Acta Seismol. Sin.*, **5**(2), 129-144.

Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces. *J. Earthq. Pred. Res.*, **7**, 465-495.

Mogi, K., 1979, Two kinds of seismic gaps. *Pure Appl. Geophys.*, **117**(6): 1172-1186.

Singh, S. K., Rodriguez, M. and Esteva, L., 1983, Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1779-1796.

Walker, R., Jackson, J. and Calum, B., 2004, Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophys. J. Int.*, **157**, 256-282.

Zhu, C., 2000, Empirical approaches to earthquake prediction. Lecture Note, Institute of Geophysics, CSB, Beijing China.

شکل گرفته‌اند. این سه کاف به ترتیب در محدوده جغرافیایی ۵۴ تا ۵۷ درجه طول شرقی و ۲۹ تا ۳۲ درجه عرض شمالی، ۵۷/۵ تا ۶۱ درجه طول شرقی و ۲۹/۵ تا ۳۲/۵ درجه عرض شمالی و ۵۷ تا ۶۰ درجه طول شرقی و ۳۲/۵ تا ۳۵ درجه عرض شمالی واقع شده‌اند که به ترتیب کاف‌های آماده‌سازی بم، سفیدآبه و دشت بیاض نامیده شده‌اند.

در شمال شرق ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران، در کاف آماده‌سازی دشت بیاض، هنوز احتمال وقوع زمین‌لرزه وجود دارد. رویداد زمین‌لرزه‌های سفیدآبه با بزرگی ۶/۱، کریزان (قائن - بیرجند) با بزرگی ۷/۰ و بم با بزرگی ۶/۸ به ترتیب با شکل‌گیری کاف‌های آماده‌سازی سفیدآبه از ۱۹۸۳، کاف‌های آماده‌سازی دشت بیاض از ۱۹۹۰ و کاف‌های آماده‌سازی بم از ۱۹۹۰ مورد انتظار بوده‌اند. بیشینه بزرگی زمین‌لرزه‌های مرتبط با هر کاف با روابط تجربی بر پایه طول محور اصلی کاف و مدت زمان شکل‌گیری کاف برآورد شده است. با شناسایی کاف‌های لرزه‌ای بر پایه توزیع زمانی و مکانی رویداد زمین‌لرزه‌ها می‌توان از سه مؤلفه اساسی پیش‌بینی زمین‌لرزه یعنی زمان، مکان و بزرگی، دو مؤلفه مکان و بزرگی را با شناسایی محل کاف و تعیین ابعاد آن و زمان رویداد زمین‌لرزه را نیز با شکل‌گیری کاف آماده‌سازی با پنجره زمانی چندساله که بازه زمانی موردنظر در پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه است می‌توان تعیین کرد.

بنابراین، پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه براساس کاف‌های لرزه‌ای روشی نسبتاً آسان، بسیار کم‌هزینه و تا حد زیادی نتیجه‌بخش است. بدیهی است در صورت فراهم بودن داده‌های با عدم قطعیت کمتر (به ویژه در