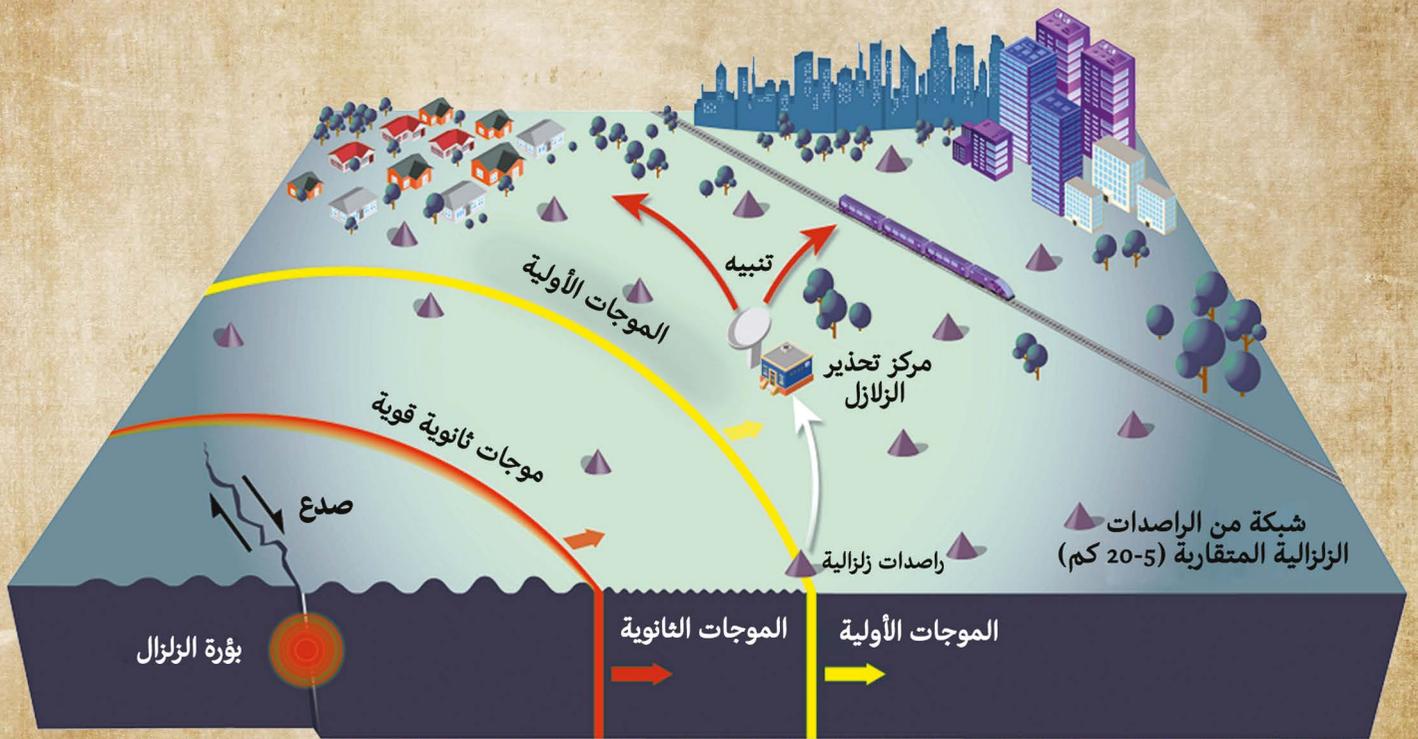


انظمة الإنذار المبكر للزلازل

Earthquake Early Warning Systems



عبدالله بن محمد العمري

قسم الجيولوجيا و الجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٥ هـ - ٢٠٢٤ م



ح عبد الله بن محمد العمري، ١٤٤٥هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد

أنظمة الانذار المبكر للزلازل. / عبدالله بن محمد العمري - ط ١ -

الرياض، ١٤٤٥هـ

٢٠٢ صفحة ، ٢١ X ٢٧ سم

ردمك: ٩٥٩٦-٢-٠٤-٦٠٣-٩٧٨ رقم الإيداع ١٧١٨١ / ١٤٤٥

حقوق الطبع محفوظة للمؤلف

الطبعة الأولى

١٤٤٥هـ / ٢٠٢٤م

للنشر
العبيكان
Obekkan
Publishing

للاستفسارات والملاحظات: الاتصال على المؤلف

alamri.geo@gmail.com

www.alamrigeo.com

هاتف : +966505481215

جميع الحقوق محفوظة، ولا يسمح بإعادة إصدار هذه الموسوعة أو نقلها في أي شكل أو واسطة، سواء أكانت إلكترونية أو ميكانيكية بما في ذلك التصوير بالنسخ (فوتوكوبي)، أو التسجيل، أو التخزين والاسترجاع، دون إذن خطي من المؤلف.









تمهيد

تم بحمد لله إنجاز **ست موسوعات** شاملة ومبسطة ترتبط بتاريخ العلوم بصفة عامة وعلاقة علوم الأرض بصفة خاصة بالفضاء والبيئة والتعدين والطاقة والمياه والمخاطر الطبيعية، تهدف هذه الموسوعات المدعمة بالصور والأشكال التوضيحية إلى خدمة الباحثين وطلاب التعليم العام والجامعات وفئات المجتمع كافة، نظرا لندرة المراجع العربية في هذا المجال، تغطي الموسوعات تحديداً **ست مجالات**:

الموسوعة الأولى: في أكثر من **5500 صفحة**، عبارة عن موسوعة تعليمية ثقافية مكونة من **30 كتابا** مبسطة في شتى علوم الأرض، من ضمنها ستة كتب احتوت على **2020 سؤال** وجواب باللغة الإنجليزية لمساعدة طلاب علوم الأرض والباحثين عربياً وعالمياً وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة.



الموسوعة الثانية: في **1080 صفحة**، تبحث في التسلسل التاريخي والزمني في أصول عشرة علوم معرفية مزودة بالمخطوطات والوثائق القديمة عن تاريخ الطب والصيدلة، تاريخ علم الأرض (الجيولوجيا)، تاريخ الكيمياء، تاريخ الفيزياء، تاريخ الفلك، تاريخ الرياضيات، تاريخ الجغرافيا، تاريخ النبات، تاريخ الحيوان، وأخيراً تاريخ فن العمارة والهندسة.



الموسوعة الثالثة: في **965 صفحة**، تناقش علوم الأرض والفضاء والعلاقة بينهما ودور المساهمات العلمية في استكشاف الفضاء والرحلات المكوكية. تغطي عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية بالإضافة إلى علاقة الأرض بالمجموعة الشمسية وبالأخص دور القمر ومنازله في ظاهرة المد والجزر وعلاقته بظاهرتي الخسوف والكسوف. دور البحار والمحيطات في الحفاظ على النظام الأرضي والبيئي.





الموسوعة الرابعة: في **1112 صفحة**، تغطي كل ما يتعلق بالمخاطر الطبيعية وإدارتها وكيفية التعامل معها والتقليل من مخاطرها بالتركيز على الزلازل والبراكين والتسونامي والفيضانات والانزلاقات والانهيارات الأرضية والتصحر والجفاف ودورها في التأثير على بنية الأرض وبيئتها.



الموسوعة الخامسة: في **1050 صفحة**، تغطي كل ما يتعلق بالبيئة والمياه والمشاكل البيئية وحلولها والتفاعلات بين الأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض، التغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري ودور الأمطار والسيول والسدود في النظام المائي. تقنين الإدارة المتكاملة للموارد المائية والاستفادة منها وتطوير أساليب تنميتها والحفاظ عليها.



الموسوعة السادسة: في **xxxxxx صفحة**، تناقش هذه الموسوعة مصادر الثروات المعدنية والتعدينية والطاقة الغير متجددة (طاقة النفط والفحم والصخر الزيتي) والمتجددة صديقة البيئة (طاقة الشمس، وطاقة الرياح، والطاقة الكهرومائية، والطاقة الحرارية الأرضية) بالإضافة إلى الطاقة النووية ومدى تأثير هذه المصادر على الطبيعة اقتصادياً وبيئياً والتحديات التي تواجه مستقبل الطاقة والاستثمار التعديني.



www.alamrigeo.com

الموسوعات والكتب والأبحاث العلمية والتقارير الفنية والمحاضرات وغيرها في متناول الجميع على الرابط:

والله الموفق

المؤلف

عبدالله بن محمد العمري





المحتويات

5	• تمهيد
9	• مقدمة
15	• دور الموجات الزلزالية في أنظمة الإنذار المبكر
23	• هل يمكن التنبؤ بالزلازل؟
26	• مراحل توقع الزلازل
29	• تقييم التنبؤات بالزلازل
32	• طرق التنبؤ بالزلازل
48	• نظرية الارتداد المرن
50	• الزلازل المميزة
52	• الفجوات الزلزالية
54	• الانمط الزلزالية
56	• التعلم الآلي
58	• النبضات الكهرومغناطيسية الناجمة عن الزلازل
60	• تدابير التخفيف من اضرار الزلازل
61	• معلومات ما بعد الزلزال والانذار المبكر
64	• التنفيذ والمشكلات المرتبطة به





المحتويات

67	• البحوث الاساسية للإنذار المبكر بالزلازل
69	• هل يمكن التحكم في قدر الزلزال في خلال الثواني الاولى؟
74	• الموقع الأمثل في الوقت الحقيقي للإنذار
83	• التقييم الكمي للمخاطر الزلزالية
88	• وصف المصدر لمنطقة زلزالية تكتونية
105	• الإنذار المبكر بالزلازل وآفاق التطبيقات الهندسية
112	• علم الزلازل في الوقت الحقيقي والأنظمة الهجينة
117	• إمكانية تطبيق نظام الإنذار المبكر بالزلازل
122	• ما وراء الإنذارات الكاذبة
127	• الآفاق المستقبلية لهندسة الإنذار المبكر بالزلازل
130	• تحذيرات الزلازل للهيئات الحكومية والافراد
132	• سيناريوهات التحذير من الزلازل
137	• أنظمة المراقبة الجغرافية المستخدمة في الإنذار
141	• التجربة الايطالية في تقدير الوقت الحقيقي للإنذار
160	• التجربة الأمريكية في منهجية الإنذار المبكر بالزلازل
191	• التجربة اليابانية في أنظمة الإنذار المبكر
201	• المراجع





مقدمة

في العقود القليلة الماضية، زادت الخسائر الاقتصادية الناجمة عن الكوارث الطبيعية بشكل كبير في جميع أنحاء العالم ولم يُحرز تقدم يذكر في خفض معدل الوفيات. وينطبق هذا أيضًا على **كوارث الزلازل** ويرجع ذلك أساسًا إلى زيادة الكثافة السكانية والصناعية في المناطق شديدة الخطورة والضعف. مع أن **التنبؤ بالزلازل** ليس ممكنًا بعد، إلا أن التكنولوجيا الحالية تسمح بالتعرف السريع على بداية أي حدث زلزالي خطير. ومن ثم، أصبحت نظم الإنذار المبكر والمعلومات السريعة عن الكوارث وسيلة مهمة لتعزيز الوقاية والقدرة الاجتماعية على مواجهة الآثار الضارة الناجمة عن الأحداث الطبيعية الكبرى، ومن ثم ينبغي أن تصبح حجر الزاوية في التخفيف من آثار الكوارث.

يُستخدم حاليًا مصطلح الإنذار المبكر على نطاق واسع بمعانٍ مختلفة في المجتمعات العلمية والاقتصادية والاجتماعية. وحتى في المجتمع العلمي، يُستخدم هذا المصطلح بطرائق مختلفة قليلًا مع وجود إجماع متزايد على تعريف الإنذار المبكر باعتباره كل الإجراءات التي يمكن اتخاذها خلال الفترة الزمنية اللازمة لوقوع **حدث كارثي**.

تعرف المهلة الزمنية على أنها الوقت المنقضي بين اللحظة التي يكون فيها وقوع حدث كارثي في مكان معين مؤكدًا بشكل معقول ولحظة حدوثه بالفعل. تتراوح المهلة الزمنية النموذجية بين ثوانٍ وعشرات الثواني في حالة الزلازل، ومن دقائق إلى ساعات في **حالة التسونامي**، ومن ساعات إلى أيام في حالة الانهيارات الأرضية والفيضان والانهيارات البركانية.





عموماً، الإنذار المبكر هو توفير معلومات فعالة في الوقت المناسب، من خلال مؤسسات محددة، مما يسمح للأفراد المعرضين لخطر ما باتخاذ الإجراءات اللازمة لتجنب مخاطرها أو تقليلها والاستعداد للاستجابة الفعالة.

مع أن تعريف المهلة الزمنية للمخاطر غير الزلزالية قد يكون غامضاً (قد يحتاج مصطلح «مؤكد إلى حد معقول» إلى تعريف احتمالي أكثر دقة)، فإن التعريف بالنسبة للزلازل لا لبس فيه لأن المهلة ستبدأ عندما يتم إطلاق الموجات الأولى من مصدر الزلزال.

في الواقع، فإن الأساس المادي للإنذار المبكر بالزلازل بسيط: اهتزاز الأرض القوي يحدث بسبب موجات القص والموجات السطحية اللاحقة التي تنتقل أبطأ بكثير (نحو نصف سرعة الموجات الأولية) من الإشارات الكهرومغناطيسية المنقولة لاسلكياً و/أو عن طريق كابل. ومن ثم، اعتماداً على مسافة الزلزال القوي من المنطقة الحضرية المهددة بالدمار، فإن نقل المعلومات والتحليل في الوقت الفعلي للموجة الأولية السريعة قد يوفر تحذيرات من بضع ثوانٍ إلى بضع عشرات من الثواني قبل وصول الهزة الأرضية القوية.

ويمكن استخدام هذا لتقليل الأضرار التي لحقت بالممتلكات والخسائر في الأرواح في المناطق الحضرية وللمساعدة في الاستجابة لحالات الطوارئ. عند توفر شبكة زلزالية مناسبة، يمكن تطبيق طرائق المعالجة السريعة لتحديد موقع الزلزال وتحديد قوته وتقدير توزيع الحركة الأرضية (النهج الإقليمي).

في موقع مجهز بأجهزة استشعار زلزالية، من الممكن إصدار تحذير خاص بالموقع باستخدام أول وصول منخفض السرعة (موجات P) لاستنتاج الحركة بسبب القص عالي السرعة والموجات السطحية التالية.





أساسيات الإنذار المبكر بالزلازل ShakeAlert®

- ١ عند حدوث زلزال، تشع الموجات الانضغاطية (P) والموجات المستعرضة (S) إلى الخارج من مركز الزلزال.
- ٢ تقوم الموجة P، التي تنتقل بشكل أسرع، بالوصول لأجهزة الاستشعار الموجودة في المناظر الطبيعية، وتنقل البيانات إلى مركز معالجة ShakeAlert® حيث يتم تحديد الموقع والحجم والاهتزاز المقدر للزلزال. فإذا كان الزلزال يناسب الملف الصحيح، فسيتم إصدار رسالة ShakeAlert® من قبل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية.
- ٣ يتم التقاط الرسالة من قبل شركاء ShakeAlert® والتي يمكن استخدامها لإنتاج تنبيه لإخطار الأشخاص باتخاذ إجراء وقائي مثل الإسقاط والتغطية والانتظار و/أو تشغيل إجراء تلقائي.



تعمل أنظمة الإنذار المبكر بالزلازل مثل ShakeAlert® لأنه يمكن إرسال التنبيه بشكل فوري تقريباً، بينما تنتقل الموجات المهتزة الناتجة عن الزلزال عبر الطبقات الضحلة من الأرض بسرعة تتراوح من كيلومتر واحد إلى بضع كيلومترات في الثانية. يوضح هذا الرسم البياني كيفية عمل مثل هذا النظام.





يمكن أن يكون تطبيق أنظمة الإنذار المبكر بالزلازل (EEWS) فعالاً جداً في التخفيف من المخاطر في الوقت الفعلي، مما يعزز هامش الأمان لأنظمة هندسية مهمة محددة مثل محطات الطاقة النووية أو البنى التحتية للنقل عن طريق تقليل تعرض المنشأة لإجراءات السلامة الآلية.

يمكن استخدام نظام الإنذار المبكر لتحفيز الإغلاق المنظم لخطوط الأنابيب وخطوط الغاز لتجنب الحرائق، أو إيقاف عمليات التصنيع لتقليل الأضرار المحتملة للمعدات والحوادث الصناعية.

كما يمكن تعزيز السلامة الشخصية إذا أمكن تنبيه الأشخاص. بالإضافة إلى ذلك، فإن وظائف المجتمع الحديث ستكون أقل عرضة للتحويل إلى الفوضى إذا توفر إنذار مبكر للزلازل وإذا جرى تنفيذ التدريب على الإجراءات المناسبة. وقد ترسل فرق الاستجابة للطوارئ إلى حيث تشتد الحاجة إليها إذا أمكن توفير خرائط الهزات الأرضية القوية بواسطة نظام الإنذار المبكر في غضون دقائق قليلة.

بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تكون أنظمة الإنذار المبكر بالزلازل ذات قيمة كبيرة في تقليل الأضرار والخسائر الناجمة عن الأحداث الثانوية الناجمة عن الزلازل. وقد تشمل هذه الانهيارات الأرضية وأمواج التسونامي والحرائق والحوادث الصناعية.

إن الحرائق التي دمرت سان فرانسيسكو بعد زلزال عام 1906 والتسونامي الذي ضرب إندونيسيا في ديسمبر 2004 هما حالتان كلاسيكيتان، ولكن في معظم الزلازل الكبرى، تفاقمت الخسائر الاقتصادية والخسائر البشرية بسبب ظواهر ثانوية.

مع الاعتبارات المذكورة أعلاه، في الوقت الحاضر لا تستخدم إمكانات أساليب الإنذار المبكر الزلزالية بشكل كامل. ولا ينطبق هذا على البلدان النامية فحسب، بل ينطبق أيضاً على البلدان الصناعية العالية بما في ذلك البلدان الأوروبية.





لم يجر تطوير أو تحسين معظم طرائق المعالجة الزلزالية الحالية لتطبيقات الوقت الفعلي أو تطبيقات الوقت الفعلي تقريباً كما هو مطلوب للإنذار المبكر. ولذلك فإن تطوير أساليب التحليل والنمذجة والمحاكاة في الوقت الحقيقي، وتكاملها مع المرافق المناسبة لمعالجة البيانات والتصوير ونظم المعلومات السريعة وتطبيقها على الإنذار المبكر بالزلازل بالتزامن مع إدارة الكوارث، يعد أحد التحديات الرئيسية التي تواجه علم الزلازل اليوم.

إحدى المشكلات الأساسية في الإنذار المبكر بالزلازل هي تطوير خوارزميات في الوقت الفعلي لتحديد سريع لمعالم مصدر الزلازل وتقدير موثوقيتها. يتضمن ذلك مشكلات اكتشاف الأحداث وتحديد موقعها في الوقت الفعلي، ورسم خرائط الصدوع في الوقت الفعلي، فضلاً عن الأساليب الجديدة لتحديد القدر/ اللحظة بسرعة استناداً إلى بيانات الحركة القوية، وتكنولوجيا المصفوفة الزلزالية الحديثة ومفهوم مقدار الطاقة. يعد المفهوم الأخير مفيداً جداً لتقدير قدر الأحداث الكبرى. ويتمثل التحدي العلمي والتكنولوجي في الحصول على هذا النوع من المعلومات بعد ثوانٍ قليلة من وصول الموجة P الأولى.

إلى جانب تطوير الخوارزميات المناسبة في الوقت الفعلي، من الضروري وضع استراتيجية لتوصيل المعلومات الزلزالية التي جرى الحصول عليها بسرعة ليس فقط بالنسبة إلى مديري الكوارث، ولكن أيضاً إلى الأطراف المعنية الأخرى من الحماية المدنية والسياسة والإعلام والعلماء والجمهور. ومع ذلك، قد يلزم تمديد وقت التحذير المتضمن في هذه المهمة إلى دقائق أو عشرات الدقائق أو أكثر. ستكون هناك أهمية خاصة لمخططي الطوارئ لمفهوم عالم الزلازل الافتراضي، الذي يأخذ في الاعتبار المعلومات الموجودة مسبقاً لتقدير وربما تقليل حالات عدم





اليقين في تحديدات معالم المصدر، والتي على وجه الخصوص يمكن أن تستنتج من معلومات معالم المصدر قراراً محدداً دعم إدارة الكوارث.

تكتشف أنظمة الإنذار المسبق للزلازل الموجات الأولية غير المدمرة (**موجات P**) التي تنتقل بسرعة عبر القشرة الأرضية، قبل الموجات الثانوية المدمرة (**موجات S**).

يتحكم التأخير بين وصول الموجات **P** وموجات **S** في مقدار التحذير المسبق الذي يمكن تقديمه. ويزداد الفاصل الزمني كلما كان الموقع أبعد عن مركز الزلزال. تتراوح هذه الفترة بشكل عام بين 60 و90 ثانية بالنسبة للزلازل العميقة والبعيدة والكبيرة. القاعدة العامة هي أن الفاصل الزمني ثانية واحدة لكل كيلومترين (**كم**) من مصدر الزلزال، وتعتمد فعالية الإنذار المسبق على الكشف الدقيق عن موجات **P** ورفض الاهتزازات الأرضية الإيجابية الكاذبة الناتجة عن النشاط المحلي.

سنبحث في هذا التقرير عمليات التنبؤ بالزلازل وكيفية تقييمها وطرائق التنبؤ بها المختلفة. بعدها ننتقل لإجراءات التخفيف من أضرار الزلازل في الوقت الحقيقي ومن ثم الإجابة على السؤال: هل يمكن التحكم في قدر الزلزال خلال الثواني الأولى من التمزق؟ وكيفية اختيار الموقع الأمثل في الوقت الحقيقي للإنذار المبكر من الزلازل ومن ثم كيفية إجراء التقييم الكمي للمخاطر الزلزالية. كما تناول العمل الآفاق التطبيقية الهندسية للإنذار المبكر من الزلازل وكيف يمكن للهيئات الحكومية وفئات المجتمع تلقي تحذيرات الزلازل وأخذها على محمل الجد.

أخيراً كان لابد من استعراض تجارب **ثلاث** دول، وهي إيطاليا وأمريكا واليابان، للاستفادة منها في مجال الإنذار المبكر من الزلازل.





دور الموجات الزلزالية في أنظمة الإنذار المبكر

يُتولد عن حدوث الزلازل في نقطة ما في الأرض نوعان من الموجات الزلزالية المرنة، تنتشر في جميع الاتجاهات مبتعدة عن موقعه، وتسمى النقطة التي تنطلق منها الحركة داخل الأرض بؤرة الزلزال Hypocenter بينما تسمى النقطة على سطح الأرض الواقعة مباشرة فوق بؤرة الزلزال مركز الزلزال السطحي Epicenter وتعرف المسافة العمودية بين مركز الزلزال وبؤرته بعمق الهزة Focal Depth، ويمكن تقسيم الموجات الزلزالية إلى:

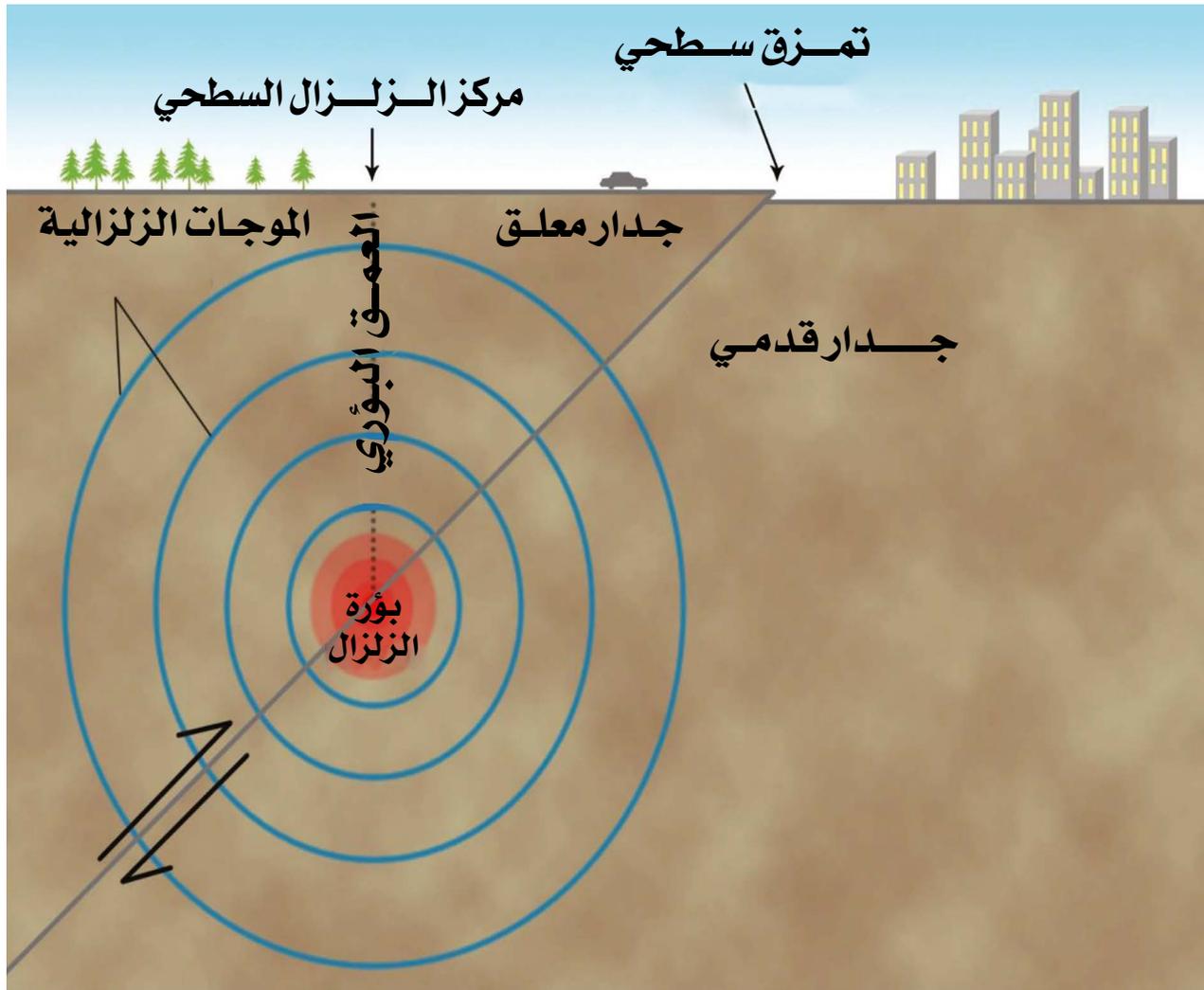
1. الموجات الداخلية Body Waves

تُعرف الموجات الزلزالية الداخلية أو الجسمية بأنها الموجات التي تنفذ من خلال جسم الأرض لتظهر في مناطق أخرى على سطحها، وتقسم الموجات الداخلية إلى نوعين هما:

• الموجات الأولية P - Primary Waves

وتسمى أيضاً بالموجات الطولية أو الموجات التضاغطية Compressional Waves تنتشر هذه الموجات خلال الأجسام الصلبة والسائلة والغازية في صورة تضاغطات وتخلخلات متوالية، وتتميز بأنها ذات ذبذبات قصيرة، وتسير بسرعة عالية، ولذا فإنها تصل إلى أجهزة رصد الزلازل قبل غيرها من الموجات الأخرى، كما أنها عند وصولها إلى سطح الأرض - قادمة من العمق - يتحول جزء منها إلى موجات صوتية في الهواء يمكن للإنسان سماعها عند ذبذبات معينة (تزيد على 15 ذبذبة في الثانية).





شكل يوضح بؤرة الزلزال ومركزه السطحي ومستوى الصدع



• الموجات الثانوية S- Secondary Waves

وتسمى أيضاً بموجات القص أو القصيرة أو الإزاحة **Shear Waves**، وتنتقل في الأجسام الصلبة فقط عن طريق الاهتزاز من جانب إلى آخر كأنها تقوم بـ**قص** الصخر أو **إزاحته** في اتجاه عمودي على اتجاه **حركتها** وهي ذات سرعات منخفضة، وتصل إلى أجهزة الرصد بعد الموجات الأولية ولذا تسمى **بالموجات الثانوية**. وتستخدم **الموجات** الداخلية (الأولية والثانوية) في إعطاء صورة **واضحة** عن التركيب الداخلي للأرض، وتحديد مركز **الزلازل** وبؤرته. وتتوقف سرعة **الموجات** الأولية والثانوية على كثافة وخواص **الصخور**، وعند حدوث **الزلازل** يلاحظ في البداية تأثير الموجة الأولية وينتج عنها **اهتزاز** الأشياء غير الثابتة، **مثل**: الأثاث والأبواب والنوافذ، يلي ذلك الموجة **الثانوية** التي تهز الأرض في **الاتجاهين** الأفقي والرأسي، ينتج عنها **أضرار** في **المباني** والمنشآت.

$$V_P / V_S = (2(1 - \alpha) / 1 - 2\alpha)^{0.5}$$

وبالتالي

$$\alpha = V_P^2 - 2V_S^2 / 2(V_P^2 - V_S^2)$$

$\alpha = 0$ معامل **بواسون** في السوائل، لذلك لا يمكن لموجات **S** أن تنتشر عبر **السوائل**. يتم تحديد نسبة **Poisson** نظرياً بين 0 و 0.5 وبالنسبة لمعظم **الصخور** تقريباً 0.25، لذلك عادةً ما يكون V_P / V_S حوالي 1.7





2. الموجات السطحية Surface Waves

تُعد الموجات السطحية **Surface Waves - L** الأكثر تدميراً، وهي تنتقل بالقرب من سطح الأرض دون أن تمر إلى جوفها، وهي أبطأ أنواع الموجات الزلزالية وآخر ما يتم التقاطه على أجهزة الرصد. وتُقسم الموجات السطحية إلى نوعين هما:

• موجة لوف

وتم تسميتها نسبة إلى العالم البريطاني أوغسطس لوف **Love** الذي اكتشفها عام 1885 م، وينتج عنها ذبذبات تشبه ذبذبات الموجة الثانوية ولكن في الاتجاه الأفقي فقط، وهي تؤثر بصفة خاصة على أساسات المنشآت.

• موجة رالي

وتمت تسميتها نسبة إلى العالم البريطاني رالي **Rayleigh** الذي اكتشفها عام 1911م، وهي تشبه أمواج البحر الدائرية، وفي تحريكها للماء، وتعمل هذه الموجة على تحريك الأشياء في المستويين الأفقي والرأسي في اتجاه عمودي على اتجاه الموجة.



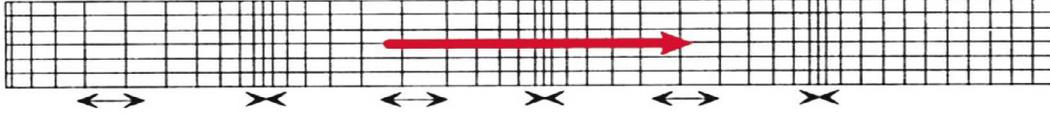


وتتجلى أهمية **الموجات السطحية** في قدرتها **المدمرة**، بينما تكمن أهمية **الأمواج الطولية** والقصيرة في قدرتها على **إجلاء** الصورة الواضحة عن **داخلية الأرض**، وكذلك في تحديد **بؤرة الزلازل** حيث يتباين زمن وصول **الموجتين**، **فالفرق** بينهما يجعل من **السهل** تحديد **الفرق الزمني** بين **الموجتين** القادمتين من مصدر **وآخر** للدلالة على **بُعد الزلازل**. وهذا هو **بعينه** ما يحدث في **حالة البرق والرعد**، فنحن **نبصر البرق أولاً** ثم **نسمع الرعد** بعد ذلك، وهذا **يرجع** إلى أن الضوء ينتقل **بسرعة أكبر** من سرعة الصوت، ونستطيع أن **نحدد بُعد العاصفة** بمعرفة **الفرق** بين زمن وصول كل من **البرق والرعد** إلينا، فإذا كانت **تفصلهما فترة زمنية** وجيزة كانت **العاصفة قريبة**، أما إذا **استغرق** وصول الرعد **فترة طويلة** فإن **العاصفة** تكون بعيدة.

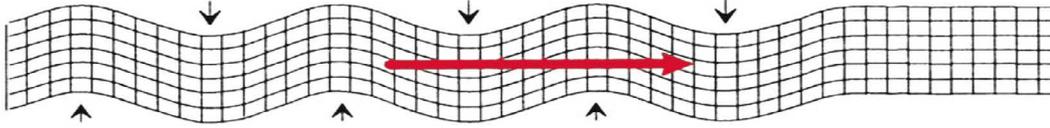




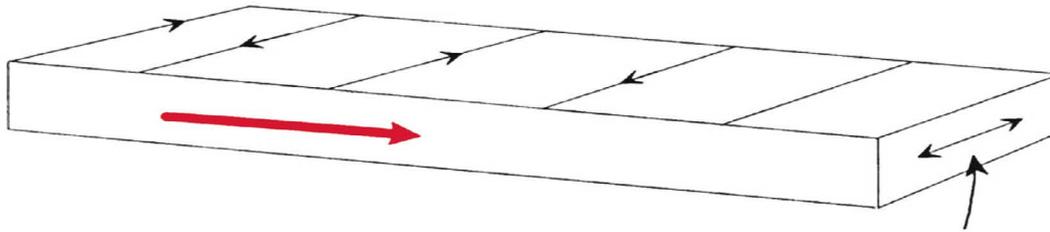
P- موجة أولية (طولية)



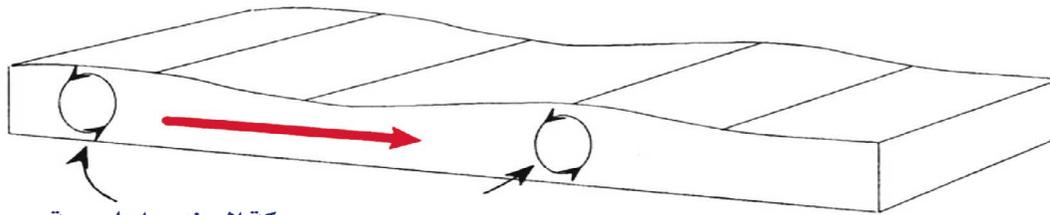
S- موجة ثانوية (قصيرة)



موجة سطحية (لوف)



موجة سطحية (موجة رايلي)



حركة الجزيء اهليجية
تراجعية

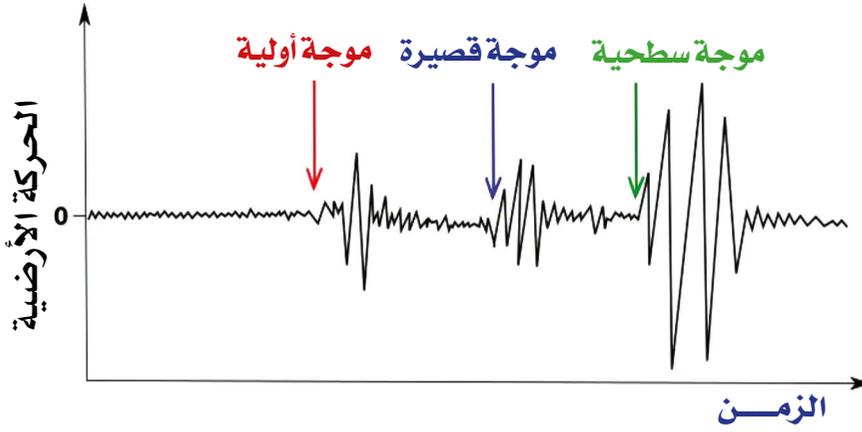
حركة الجزيء
اهليجية تقدمية

انتشار الموجة

اتجاهات حركة الجزيء

أنواع الموجات الزلزالية واتجاه حركتها





جهاز راصد الزلازل

زمن وصول الموجات الزلزالية وسعتها

عندما **تنظر** إلى مخطط **الزلازل**، سيكون هناك خطوط متعرجة في جميع أنحاء. هذه هي كل الموجات الزلزالية التي سجلها جهاز قياس الزلازل. كانت معظم هذه الموجات صغيرة جداً لدرجة أن لا أحد يشعر بها. يمكن أن تحدث هذه الزلازل الصغيرة بسبب حركة المرور الكثيفة بالقرب من جهاز قياس الزلازل، والأمواج التي تضرب الشاطئ، والرياح، وأي عدد من الأشياء العادية الأخرى التي تسبب بعض اهتزاز جهاز قياس الزلازل. ستكون الموجة P هي أول اهتزاز أكبر من بقية الزلازل الصغيرة. لأن الموجات P هي أسرع الموجات الزلزالية، فعادة ما تكون الموجات الأولى التي يسجلها جهاز قياس الزلازل. ستكون المجموعة التالية من الموجات الزلزالية على مخطط الزلازل هي



الموجات S. وعادة ما تكون هذه أكبر من **موجات P**. الموجات السطحية (**موجات لوف ورايلي**) هي الموجات الأخرى، غالباً ما تكون أكبر، موضحة على مخطط الزلازل. لديهم تردد أقل، مما يعني أن **الموجات** (الخطوط؛ الصعود والهبوط) أكثر انتشاراً. تنتقل **الموجات السطحية** أبطأ قليلاً من **الموجات S** (التي بدورها تكون أبطأ من **الموجات P**) لذلك تميل إلى الوصول إلى جهاز قياس **الزلازل** بعد **موجات S**. بالنسبة للزلازل الضحلة (**الزلازل** مع التركيز بالقرب من سطح الأرض)، قد تكون الموجات السطحية أكبر الموجات التي سجلها جهاز قياس الزلازل. غالباً ما تكون الأمواج الوحيدة التي تم تسجيلها على مسافة طويلة من الزلازل متوسطة الحجم.





هل يمكن التنبؤ بالزلازل؟

التنبؤ بالزلازل هو فرع من علم الزلازل يهتم بتحديد وقت وموقع وقدر الزلازل المستقبلية ضمن الحدود المعلنة، وخاصة «تحديد معالم الزلازل القوي التالي الذي سيحدث في منطقة ما». يمكن أحياناً تمييز التنبؤ بالزلازل عن توقع الزلازل، والذي يمكن تعريفه على أنه التقييم الاحتمالي لخطر الزلازل العام، بما في ذلك تكرار وقدر الزلازل المدمرة في منطقة معينة على مدار سنوات أو عقود.

لقد **عانت** البشرية ولا تزال تعاني من كوارث الزلازل التي يذهب ضحيتها آلاف البشر بجانب الخسائر المادية الجسمية، ونتيجة لكون مسببات الزلازل والعمليات التي تحدث في البؤرة أثناء حدوث الزلازل ليست معروفة بشكل مطلق، لذا أصبحت عملية التنبؤ بالزلازل أمراً في غاية الصعوبة على الرغم من بعض المحاولات الناجحة في بعض الدول المتقدمة. يعتقد معظم الباحثين في مجال الزلازل أن التنبؤ بالزلازل هدف يمكن الوصول إليه، لذا بذلت كل الجهود الممكنة من أجل الوصول إلى هذا الهدف ولو أن البعض يرى أن نتائج التنبؤ ربما تكون ضارة وغير نافعة وخصوصاً عند فشل إحدى هذه التنبؤات، فإن الناس بالتأكيد ستتجاهل أي تحذيرات بقرّب وقوع **كارثة** بعد ذلك.

هناك **فرق كبير** بين التنبؤ وتوقع حدوث **الزلازل**. فالتنبؤ هو تحديد مكان وزمان حدوث الزلازل بدقة، ويكون في حدود عدة ساعات، وهذا غير متاح على المستوى العالمي. أما التوقع بالتخمين فهو مبني على دراسات تاريخية مستمرة للمنطقة **زلزالياً وجيولوجياً**.

إن **البركان** مهما كان أمره يمكن الفرار منه فهو ينذر الناس قبل ثورانه، أما الزلازل فإنها لا تنذر الناس قبل وقوعها ولا يمكن التنبؤ عما إذا كانت ستحدث





بعد يوم أو شهر أو سنة، ولذلك فلا مفر منها، حيث إنها تضرب ضربتها فجأة وبعد دقيقتين أو ثلاث دقائق يكون كل شيء قد انتهى، لذا بلغ عدد من فقدوا حياتهم بسبب الزلازل أضعاف أولئك الذين فقدوا بسبب ثوران البراكين.

في السبعينات، كان العلماء متفائلين بإمكانية العثور على طريقة عملية للتنبؤ بالزلازل قريباً، ولكن بحلول التسعينات، أدى الفشل المستمر إلى دفع الكثيرين إلى التساؤل عما إذا كان ذلك ممكناً. لم تحدث تنبؤات ناجحة بشكل واضح لحدوث زلازل كبيرة، كما أن ادعاءات النجاح القليلة مثيرة للجدل. على سبيل المثال، الادعاء الأكثر شهرة للتنبؤ الناجح هو الادعاء المتعلق بزلزال هايتشنغ عام 1975، فقد توصلت دراسة لاحقة إلى أنه لا يوجد تنبؤ صحيح على المدى القصير.

لقد نجح العلماء السوفييات في تحديد وقت زلزال نوفمبر 1978م في أدي فيرجاتا قبل حدوثه، وكذلك في فبراير 1975م تنبأ علماء الزلازل في الصين بحدوث الزلزال وأعطوا تحذيرات قبل حدوثه بحوالي 24 ساعة بناء على مراقبة حركة الحيوانات بصورة رئيسية، ودراسة ورصد كل المتغيرات في المنطقة. ولكن في العام الذي يليه وبالتحديد في 27 يوليو 1976م وأثناء عقد مؤتمر لعلماء الزلازل في الصين لمناقشة النجاح في توقع زلزال العام الماضي حدث زلزال عظيم مفاجئ قتل حوالي 250 ألف شخص.

لم تتمخض الدراسات التي قام بها علماء الزلازل في اليابان وروسيا والصين وأمريكا عن أي قواعد ثابتة يمكن اتباعها للتنبؤ بقرّب حدوث الزلازل، وكان أقصى ما وصلوا إليه هو معدل تكرار الزلازل في مكان معين، وأوصوا بأن تكون المباني والمنشآت الهامة بعيدة عن أماكن الخطر الزلزالي حتى يمكن الإقلال من احتمالات تعرضها للانهييار إذا حدث زلزال في مكان وجودها. إن أهمية السجلات التاريخية يمكن أن تساعدنا في تحديد الأماكن التي





يتوقع حدوث زلازل فيها، ولكن لا يمكن أن تحدد وقت وقوعها، وقد أمكن لليابان رصد عدة تغيرات جيوديسية للأرض قبل عام 1964م، فقد تغير منسوب الأرض حوالي 20 سم حدث بعدها زلزال في المنطقة في 16 يونيو 1964م. وعموماً فإن التوقع الكامل لحدوث الزلازل يتمثل في معرفة ثلاثة عناصر أساسية هي: مكان وزمان وقدر الزلزال. فبالنسبة لمكان الزلزال وقدره فقد توصل العلماء إلى تحديد أكثر الأماكن تعرضاً للزلازل على الكرة الأرضية، وقدر هذه الزلازل على وجه التقريب، حيث تتم الاستفادة من هذه المعلومات في اختيار أنسب الأماكن لإقامة المشروعات العمرانية والصناعية بعيداً عن أماكن الخطر الزلزالي.

أما بالنسبة لزمن الزلزال وهو أهم العناصر، فعلى الرغم من وجود بعض الظواهر المختلفة التي قد تدل على قرب وقوع الزلزال في منطقة ما، إلا أنها ليست قاعدة ثابتة يعتمد عليها في تحديد وقت حدوثه، فقد يحدث بعد يوم أو شهر أو أكثر، وقد لا يحدث مع وجود هذه الظواهر. ومن أهم الظواهر التي قد يصاحبها حدوث هزات أرضية (زلازل) ما يلي:

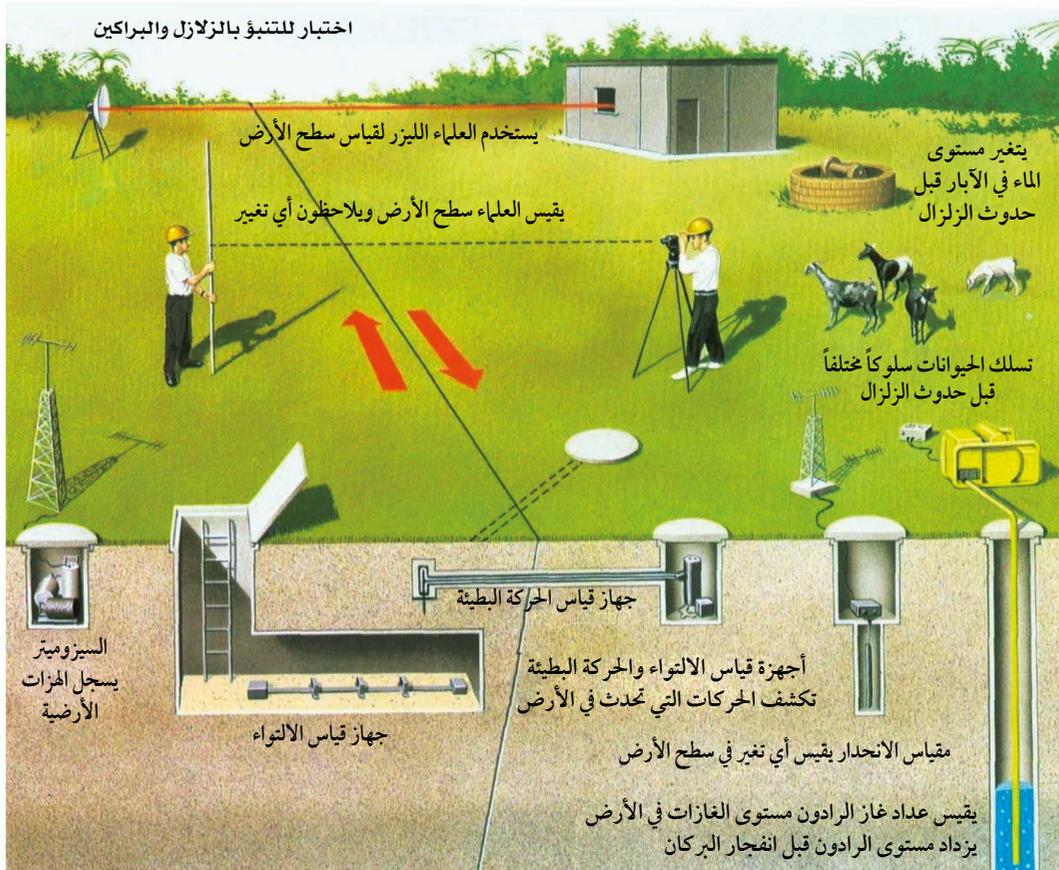
- التغيرات في سرعة الموجات الزلزالية.
- اختلال مستوى المياه الجوفية في الآبار قبل حدوث الزلازل.
- تشوهات في سطح الأرض في المناطق القريبة من البؤرة وتحرك القشرة الأرضية للأعلى وتغير قيم الجاذبية.
- انطلاق غاز الرادون Radon من الآبار على امتداد الصدوع وتغير تركيز غاز الهليوم.
- تغير في درجة التوصيل الكهربائي للصخور وتغير في المجال المغناطيسي الأرضي.
- ازدياد نشاط الهزات الأولية قبل حدوث الزلزال.
- السلوك الشاذ لبعض الحيوانات.





مراحل توقع الزلازل البعيدة والقصيرة المدى

أن بعض الحيوانات ومن بينها **سمك القرش** حساسة جداً للمجال المغناطيسي للأرض مما يجعلها تشعر بالتغيير الذي يطرأ عليه عادة قبل وقوع الزلازل وكذلك أن لبعض الكائنات الحية حاسة سمع مذهلة تنفذ إلى باطن الأرض بحيث تستطيع التقاط الأصوات المنذرة بـقرب الهزات الأرضية وتمييزها قبل وقوع الهزات وبعض الحيوانات تتميز بوجود حاسة فوق العادة تعتمد عليها في معرفة أي تغيير في خصائص الصخور قبل حدوث الزلازل.



اختبار المؤشرات القصيرة والبعيدة لمحاولة التنبؤ بالزلازل أو البركان قبل حدوثه





جميع الظواهر الوارد ذكرها تعتبر مؤشرات **تنبؤ** متوسط أو قصير **الأمد**، أما مؤشرات **التنبؤ** طويلة **الأمد** فهي تحدث في الغالب في المناطق التي تعرضت لهزات **مدمرة** في السابق، ويمكن **التنبؤ** بها عن طريق مراجعة السجلات الزلزالية التاريخية، لحساب زمن تكرار هذه الزلازل في المنطقة. إن دراسة الخرائط الزلزالية لمنطقة ما تعرضت لهزات عنيفة في الماضي، ربما يبين استمرار النشاط أو هدوء تام يتبعه انتقال في النشاط إلى مناطق مجاورة للبوّرة السابقة. وتوضع هذه الظاهرة على الخرائط الزلزالية على شكل حلقة تتكون من بوّرة **الزلازل** للمنطقة المحيطة ببوّرة **الزلازل** السابق، وتعرف بالفجوة الزلزالية **Seismic gap**.

ومع هذا ما زال **توقع الزلازل** عملية في مهدها ولم يستطع علماء **الزلازل** حتى الآن **التنبؤ** بدقة عن مواعيدها، وهذا قد يكون **رحمة من الله بعباده، والله حكمة في ذلك**. والسؤال الذي **يفرض** نفسه: ماذا سوف **يحدث** لو أنذر الناس قبل **حدوث الزلازل بساعة؟** وكيف **سيصرف الناس؟** وماذا **سيحدث** لحركة **المرور؟** وأين **سيذهب الناس...؟!**

عموماً اهتمت **معظم** الأبحاث الحالية في **الدول** المتقدمة وكرست جهودها على تقليل المخاطر المرتبطة بالزلازل، من خلال تقييم مزيج الخطر الزلزالي ومدى ضعف منطقة معينة. بشكل عام، تم اعتبار جميع محاولات التنبؤ بالزلازل بشكل عام بمثابة إخفاقات، ومن غير المرجح أن يحدث تنبؤ دقيق في المستقبل القريب. وبدلاً من ذلك، تم توجيه الجهود نحو التخفيف من حدة المخاطر نظراً لأنه **يصعب** أو **يستحيل التنبؤ بالزلازل** بسبب عنصرها **العشوائي** المتأصل وسلوكها **شبه الفوضوي**.





المعايير الفيزيائية للتنبؤ بالزلازل

المعاملات الفيزيائية	المرحلة الرابعة: الزلزال			
	المرحلة الأولى	المرحلة الثانية	المرحلة الثالثة	المرحلة الخامسة
المعاملات الفيزيائية	بناء التشوه المرن	مرحلة التخلخل وتطور الشقوق	تدفق الماء والتشوه الغير ثابت في منطقة الصدع	الهبوط الفجائي في الإجهاد متبوعا بالهزات اللاحقة
سرعة الموجة الطولية P	ثابتة	تقل	تزيد	تقل
ارتفاع الأرض	ثابتة	تزيد	تزيد	تقل
انبعاث غاز الرادون	ثابتة	تزيد	تزيد	تقل
المقاومية الكهربائية	ثابتة	تقل	تقل	تزيد
عدد الأحداث الزلزالية	تقل	تقل	تقل	تزيد

الأدلة والمعاملات الفيزيائية للتنبؤ بالزلازل





• تقييم التنبؤات بالزلازل

يمكن تمييز التنبؤ بالزلازل أيضاً عن أنظمة التحذير من الزلازل، والتي عند اكتشاف الزلزال، توفر تحذيراً في الوقت الفعلي بالثواني للمناطق المجاورة التي قد تتأثر.

تعتبر التنبؤات بالزلازل مهمة إذا أمكن إثبات نجاحها بما يتجاوز الصدفة العشوائية. ولذلك، تستخدم طرائق اختبار الفرضيات الإحصائية لتحديد احتمال حدوث زلزال كما هو متوقع على أي حال (فرضية العدم). يجري بعد ذلك تقييم التوقعات عن طريق اختبار ما إذا كانت ترتبط بالزلازل الفعلية بشكل أفضل من فرضية العدم.

ومع ذلك، في كثير من الحالات، فإن الطبيعة الإحصائية لحدوث الزلازل ليست متجانسة ببساطة. يحدث التجميع في كل من المكان والزمان. في جنوب كاليفورنيا، نحو 6% من الزلازل $M \geq 3.0$ يتبعها زلزال بقوة أكبر خلال 5 أيام و10 كيلومترات. في حين أن مثل هذه الإحصائيات ليست مرضية لأغراض التنبؤ (إعطاء عشرة إلى عشرين إنذاراً كاذباً لكل تنبؤ ناجح)، إلا أنها ستحرف نتائج أي تحليل يفترض أن الزلازل تحدث بشكل عشوائي في الوقت المناسب، على سبيل المثال، كما جرى تحقيقه من عملية بواسون. لقد ثبت أن الطريقة التي تعتمد فقط على التجميع يمكن أن تتنبأ بنجاح بنحو 5% من الزلازل؛ «أفضل بكثير من 'الصدفة'».

وبما أن الغرض من التنبؤ على المدى القصير هو تمكين تدابير الطوارئ للحد من الوفيات والدمار، فإن الفشل في إعطاء تحذير من وقوع زلزال كبير، أو على الأقل تقييم مناسب للخطر، يمكن أن يؤدي إلى مسؤولية قانونية.





على سبيل المثال، أفادت التقارير أن أعضاء الأكاديمية الصينية للعلوم جرى تغييرهم بسبب «تجاهلهم التنبؤات العلمية لزلازل تانغشان الكارثي في صيف عام 1976». وفي أعقاب زلزال **لاكويلا عام 2009**، أدين سبعة علماء وفنيين في إيطاليا بالقتل غير العمد، ولكن ليس بسبب فشلهم في التنبؤ بالزلزال، الذي قتل فيه نحو **300 شخص**، بقدر ما لأنهم قدموا تطمينات غير مبررة للسكان - كما وصفها أحد الضحايا بـ «التخدير» - أنه لن يكون هناك زلزال خطير، ومن ثم لا حاجة لاتخاذ الاحتياطات اللازمة.

ولكن التحذير من وقوع زلزال في حالة عدم وقوعه ينطوي أيضاً على تكاليف: ليس فقط تكلفة تدايير الطوارئ في حد ذاتها، بل وأيضاً تكلفة الاضطرابات المدنية والاقتصادية. كما أن الإنذارات الكاذبة، بما في ذلك الإنذارات التي جرى إلغاؤها، تقوض مصداقية التحذيرات المستقبلية، ومن ثم فعاليتها.

في عام 1999، أفيد أن الصين كانت تطبق «لوائح صارمة تهدف إلى القضاء على التحذيرات «الكاذبة» من الزلازل، من أجل منع حالات الذعر والإخلاء الجماعي للمدن الناجمة عن توقعات الهزات الكبرى». وكان الدافع وراء ذلك هو «أكثر من **30 تحذيراً** غير رسمي من الزلازل... في السنوات الثلاث الماضية، ولم يكن أي منها دقيقاً».

وتعتمد المفاضلة المقبولة بين الزلازل التي لم يجر رصدها والإنذارات الكاذبة على التقييم المجتمعي لهذه النتائج. ويجب أخذ معدل حدوث كليهما في الاعتبار عند تقييم أي طريقة للتنبؤ.





هوائي GPS في جنوب كاليفورنيا. يجري حاليًا تحويل العديد من محطات GPS في كاليفورنيا لإرسال البيانات في الوقت الفعلي إلى الشبكات. ويجري تطوير الخوارزميات لمعالجة هذه البيانات واستخدامها في إنذارات الإنذار المبكر بالزلازل.





طرق التنبؤ بالزلازل

إن التنبؤ بالزلازل هو علم غير ناضج بعد، فهو لم يؤد بعد إلى التنبؤ الناجح بالزلازل من خلال المبادئ الفيزيائية الأولى. ولذلك تركز الأبحاث في طرائق التنبؤ على التحليل التجريبي، مع اتباع نهجين عامين: إما تحديد السلائف المميزة للزلازل، أو تحديد نوع ما من الاتجاه أو النمط الجيوفيزيائي في الزلازل الذي قد يسبق زلزالاً كبيراً.

يتم اتباع الأساليب السابقة إلى حد كبير بسبب فائدتها المحتملة للتنبؤ بالزلازل على المدى القصير، في حين يُعتقد عمومًا أن أساليب «الاتجاه» مفيدة للتنبؤ على المدى الطويل (مقياس زمني من 10 إلى 100 عام) أو التنبؤ على المدى المتوسط (1 إلى 10 سنوات زمنية).

• السوابق Precursors

سوابق الزلازل والتي تسمى بالأسلاف أو السلائف هي ظاهرة شاذة قد تعطي تحذيرًا فعالاً من وقوع زلزال وشيك. التقارير عن هذه الأحداث - مع الاعتراف بها بشكل عام على هذا النحو فقط بعد الحدث - يبلغ عددها بالآلاف، ويعود تاريخ بعضها إلى العصور القديمة.

كان هناك نحو 400 تقرير عن السوابق المحتملة في الأدبيات العلمية، من نحو عشرين نوعًا مختلفًا، تتراوح من علم الطيران إلى علم الحيوان. ومع ذلك لم يعثر على أن أيًا منها يمكن الاعتماد عليه لأغراض التنبؤ بالزلازل.





في أوائل عام 1990، طلبت الرابطة الدولية لعلم الزلازل وفيزياء باطن الأرض (IASPEI) ترشيحات لقائمة أولية من السلائف المهمة. جرى تقديم أربعين ترشيحاً، اختير خمسة منها كسلائف مهمة محتملة، مع اثنين منها يعتمدان على ملاحظة واحدة لكل منهما. وبعد مراجعة نقدية للأدبيات العلمية، خلصت اللجنة الدولية للتنبؤ بالزلازل من أجل الحماية المدنية (ICEF) في عام 2011 إلى أن هناك «مجالاً كبيراً للتحسينات المنهجية في هذا النوع من الأبحاث».

وعلى وجه الخصوص، فإن العديد من حالات السلائف المبلغ عنها تكون متناقضة، أو تفتقر إلى قدر من الاتساع، أو غير مناسبة بشكل عام لإجراء تقييم إحصائي دقيق. النتائج المنشورة منحازة نحو النتائج الإيجابية، ومن ثم فإن معدل السلبيات الكاذبة (زلازل ولكن لا توجد إشارة مسبقة) غير واضح.

• سلوك الحيوان

بعد أن يبدأ الزلزال بالحدوث فعلياً، تنتقل موجات الضغط (موجات P) بسرعة مضاعفة مقارنة بموجات القص الأكثر ضرراً (موجات S). عادة لا يلاحظها البشر، وقد تلاحظ بعض الحيوانات الاهتزازات الأصغر التي تصل إلى بضع عشرات من الثواني قبل الاهتزاز الرئيسي، وتصبح منزعجة أو تظهر سلوكاً غير عادي آخر. يمكن لأجهزة قياس الزلازل أيضاً اكتشاف موجات P، ويتم استغلال فرق التوقيت بواسطة أنظمة التحذير الإلكترونية من الزلازل لتزويد البشر ببضع ثوانٍ للانتقال إلى موقع أكثر أماناً.





لم تجد مراجع للدراسات العلمية المتاحة اعتباراً من عام 2018 والتي تغطي أكثر من 130 نوعاً أدلة كافية لإظهار أن الحيوانات يمكنها تقديم تحذير من الزلازل قبل ساعات أو أيام أو أسابيع. تشير الارتباطات الإحصائية إلى أن بعض السلوكيات الحيوانية غير العادية المبلغ عنها ترجع إلى زلازل أصغر (هزات نذير) تسبق أحياناً زلزالاً كبيراً، والتي إذا كانت صغيرة بدرجة كافية قد لا يلاحظها الناس.

قد تتسبب الهزات التنبؤية أيضاً في حدوث تغيرات في المياه الجوفية أو إطلاق غازات يمكن للحيوانات اكتشافها. يكشف عن الهزات النذيرة أيضاً بواسطة أجهزة قياس الزلازل، وقد جرت دراستها منذ فترة طويلة كمتنبئات محتملة، ولكن دون نجاح. ولم يعثر علماء الزلازل على أدلة على حدوث تغيرات فيزيائية أو كيميائية على المدى المتوسط تتبأ بالزلازل التي قد تستشعرها الحيوانات.

معظم الباحثين الذين يدرسون التنبؤ الحيواني بالزلازل موجودون في الصين واليابان. معظم الأرصاد العلمية جاءت من زلزال كانتبري عام 2010 في نيوزيلندا، وزلزال أوتاكي عام 1984 في اليابان، وزلزال لاكويلا عام 2009 في إيطاليا.

قد تكون الحيوانات المعروفة بحساسيتها للمغناطيسية قادرة على اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية في نطاقات التردد المنخفضة جداً التي تصل إلى سطح الأرض قبل وقوع الزلزال، مما يسبب سلوكاً غريباً. يمكن أن تسبب هذه الموجات الكهرومغناطيسية أيضاً تأين الهواء وأكسدة الماء وتسمم الماء المحتمل الذي يمكن للحيوانات الأخرى اكتشافه.





• فرضية التمدد والانتشار

في سبعينات القرن العشرين، حظيت فرضية التمدد والانتشار بتقدير كبير باعتبارها توفر أساساً فيزيائياً لمختلف الظواهر التي يُنظر إليها على أنها سلائف محتملة للزلازل. وقد استندت إلى «أدلة قوية وقابلة للتكرار» من التجارب العملية التي تشير إلى أن الصخور البلورية شديدة الإجهاد شهدت تغيراً في القدر أو التمدد، مما يسبب تغيرات في خصائص أخرى، مثل السرعة الزلزالية والمقاومة الكهربائية، وحتى ارتفاعات واسعة النطاق في التضاريس. وكان من المعتقد أن هذا حدث في «المرحلة التحضيرية» قبل وقوع الزلزال مباشرة، ومن ثم فإن المراقبة المناسبة يمكن أن تحذر من زلزال وشيك. كان اكتشاف الاختلافات في السرعات النسبية للموجات الزلزالية الأولية والثانوية - معبراً عنها بـ Vp/Vs - أثناء مرورها عبر منطقة معينة هو الأساس للتنبؤ بزلزال بحيرة بلو ماونتن عام 1973 (نيويورك) وزلزال ريفرسايد (كاليفورنيا) عام 1974.

مع أن هذه التنبؤات كانت غير رسمية وحتى تافهة، إلا أن نجاحها الواضح كان يُنظر إليه على أنه تأكيد لكل من التوسع ووجود عملية تحضيرية، مما أدى إلى ما سمي فيما بعد «التصريحات المفترطة في التفاؤل» بأن التنبؤ الناجح بالزلازل على حافة الواقع العملي، ويبدو «أنه في طريقه إلى المستقبل». ومع ذلك، شككت العديد من الدراسات في هذه النتائج، وفي النهاية ضعفت الفرضية. وأظهرت دراسة لاحقة أنها «فشلت لعدة أسباب، ترتبط إلى حد كبير بصحة الافتراضات التي استندت إليها»، بما في ذلك الافتراض بأن النتائج المخبرية يمكن وضعها في العالم الحقيقي.





وكان العامل الآخر هو التحيز في الاختيار بأثر رجعي للمعايير. وقد أظهرت دراسات أخرى أن التوسع لا يكاد يذكر لدرجة أن ماين وآخرون خلصوا عام 2012 إلى ما يلي: «إن مفهوم 'منطقة الاستعداد' واسعة النطاق التي تشير إلى القدر المحتمل لحدث مستقبلي، يبقى أثيراً مثل الأثير الذي لم يتم اكتشافه في تجربة ميكلسون-مورلي».

• التغيرات في V_p/V_s

V_p هو رمز لسرعة الموجة الزلزالية «P» (الأولية أو التضاغطية) التي تمر عبر الصخور، بينما V_s هو رمز لسرعة الموجة «S» (الثانوية أو القصية). وقد أظهرت التجارب العملية على نطاق صغير أن نسبة هاتين سرعتين - الممثلة بالصيغة V_p/V_s - تتغير عندما تكون الصخور قريبة من نقطة التكسر. وفي سبعينات القرن العشرين، اعتُبر هذا بمثابة اختراق محتمل عندما أبلغ علماء الزلازل الروس عن ملاحظة مثل هذه التغيرات (التي تم حذفها لاحقاً) في المنطقة التي تعرضت لزلازل لاحق. يُعزى هذا التأثير، بالإضافة إلى سلائف أخرى محتملة، إلى التمدد، حيث تتمدد (أو تتوسع) الصخور المضغوطة بالقرب من نقطة الانهيار بشكل طفيف. أدت دراسة هذه الظاهرة بالقرب من بحيرة بلو ماونتن في ولاية نيويورك إلى تنبؤ ناجح، وإن كان غير رسمي، في عام 1973، وكان لها الفضل في التنبؤ بزلزال ريفرسايد (كاليفورنيا) عام 1974. ومع ذلك، لم يتبع ذلك نجاحات إضافية، وقد اقترح أن هذه التنبؤات كانت مجرد صدفة.





كان شذوذ Vp/Vs أساساً للتنبؤ عام 1976 بحدوث زلزال بقوة 5.5 إلى 6.5 درجة بالقرب من لوس أنجلوس، والذي فشل في الحدوث. لم تجد دراسات أخرى تعتمد على انفجارات المحاجر (أكثر دقة وقابلة للتكرار) أي اختلافات من هذا القبيل، في حين وجد تحليل لزلزالين في كاليفورنيا أن الاختلافات المبلغ عنها كانت على الأرجح ناجمة عن عوامل أخرى، بما في ذلك اختيار البيانات بأثر رجعي. لاحظ جيلر (1997) أن التقارير عن التغيرات الكبيرة في السرعة توقفت منذ عام 1980 تقريباً.

• انبعاثات الرادون

تحتوي معظم الصخور على كميات صغيرة من الغازات التي يمكن تمييزها نظرياً عن غازات الغلاف الجوي العادية. هناك تقارير عن ارتفاع حاد في تركيزات هذه الغازات قبل وقوع زلزال كبير؛ يُعزى ذلك إلى الإطلاق بسبب الإجهاد السابق للزلزال أو كسر الصخور. أحد هذه الغازات هو غاز الرادون، الذي ينتج عن التحلل الإشعاعي للكميات الضئيلة من اليورانيوم الموجودة في معظم الصخور.

من المحتمل أن يكون الرادون مفيداً للتنبؤ بالزلازل لأنه مشع ومن ثم يمكن اكتشافه بسهولة، كما أن نصف عمره القصير (3.8 أيام) يجعل مستويات الرادون حساسة للتقلبات قصيرة المدى.

أدرج تجميع 125 تقريراً عام 2009 عن التغيرات في انبعاثات الرادون قبل 86 زلزالاً منذ عام 1966. ومع ذلك، وجدت اللجنة الدولية للتنبؤ بالزلازل من أجل الحماية المدنية (ICCF) في مراجعتها النقدية لعام 2011 أن الزلازل التي من





المفترض أن ترتبط بها هذه التغييرات كانت تصل إلى ألف كيلومتر، وبعد أشهر، وبجميع الأقدار. وفي بعض الحالات، لوحظت الحالات الشاذة في موقع بعيد، ولكن ليس في المواقع الأقرب. ولم يجد (ICEF) «أي علاقة ذات دلالة إحصائية».

• الشذوذات الكهرومغناطيسية

تعود ملاحظات الاضطرابات الكهرومغناطيسية وإسنادها إلى عملية فشل الزلزال إلى زلزال لشبونة الكبير عام 1755، ولكن عملياً كل هذه الملاحظات قبل منتصف الستينات غير صالحة لأن الأدوات المستخدمة كانت حساسة للحركة الجسدية.

منذ ذلك الحين، جرى إرجاع العديد من الظواهر الكهربائية والمقاومة الكهربائية والمغناطيسية الشاذة إلى تغيرات الإجهاد والانفعال التي تسبق الزلازل، مما يزيد الآمال في العثور على مقدمة موثوقة للزلازل.

في حين أن مجموعة من الباحثين قد اكتسبوا الكثير من الاهتمام بأي من النظريتين حول كيفية توليد مثل هذه الظواهر، أو ادعاءات أنهم لاحظوا مثل هذه الظواهر قبل وقوع الزلزال، إلا أنه لم يثبت أن مثل هذه الظواهر هي مقدمة فعلية.

وجدت مراجعة أجرتها اللجنة الدولية للتنبؤ بالزلازل من أجل الحماية المدنية (ICEF) عام 2011 أن السلائف الكهرومغناطيسية «الأكثر إقناعاً» هي الشذوذات المغناطيسية ذات التردد المنخفض جداً، مثل حدث **كوراليتوس** المسجل قبل زلزال لوما بريتا عام 1989.





ومع ذلك، يُعتقد حاليًا أن المراقبة كانت عبارة عن خلل في النظام. لم تجد دراسة زلزال باركفيلد الذي جرى مراقبته عن كثب عام 2004 أي دليل على وجود إشارات كهرومغناطيسية تمهيدية من أي نوع؛ وأظهرت دراسة أخرى أن الزلازل التي تقل قوتها عن 5 لا تنتج إشارات عابرة مهمة. اعتبر (ICEF) أن البحث عن السلائف المفيدة لم ينجح.

• الإشارات الكهربائية الزلزالية VAN

إن الادعاء الأكثر شهرة والأكثر تعرضًا للانتقاد بشأن وجود مقدمة كهرومغناطيسية هو طريقة (VAN) التي وضعها أساتذة الفيزياء بانيوتيس فاروتسوس، وكيسار أليكسوبولوس، وكونستانتين نوميكوس والتي سميت على أسمائهم (VAN) من جامعة أثينا. وفي بحث عام 1981، زعموا أنه من خلال قياس الفولتية الجيوكهربائية - ما أسموه «الإشارات الكهربائية الزلزالية» (SES) - يمكنهم من التنبؤ بالزلازل.

في عام 1984، زعموا أن هناك «توافقًا واحدًا لواحد» بين SES والزلازل - أي أن «كل معادل كبير يسبقه SES وعلى العكس من ذلك، فإن كل SES يتبعه دائمًا معادل بقدر ومركز الزلزال. والتي يمكن التنبؤ بها بشكل موثوق» - يظهر SES ما بين 6 و 115 ساعة قبل وقوع الزلزال. وكدليل على طريقتهم زعموا سلسلة من التنبؤات الناجحة.

مع أن تقريرهم «لقي ترحيبًا من قبل البعض باعتباره إنجازًا كبيرًا»، فقد استقبله علماء الزلازل بموجة من الشكوك العامة. في عام 1996، خضعت ورقة





بحثية قدمها فريق VAN إلى مجلة **Geophysical Research Letters** لمراجعة عامة غير مسبوقة من قبل مجموعة واسعة من المراجعين، مع نشر الورقة والمراجعات في عدد خاص؛ وجد غالبية المراجعين أن أساليب VAN غير قابلة للتطبيق. أثرت انتقادات إضافية في العام نفسه في نقاش عام بين بعض مديري المدارس. كان النقد الأساسي هو أن هذه الطريقة غير قابلة للتصديق من الناحية الجيوفيزيائية وغير سليمة من الناحية العلمية. تضمنت الاعتراضات الإضافية الزيف الواضح للعلاقة الفردية المزعومة بين الزلازل والحالة البيئية والاقتصادية والاجتماعية لـ (SES)، وعدم احتمال وجود عملية تمهيدية تولد إشارات أقوى من أي إشارات مرصودة من الزلازل الفعلية، والاحتمال القوي جداً أن تكون الإشارات من صنع الإنسان.

استندت صلاحية طريقة VAN، ومن ثم الأهمية التنبؤية لـ SES، في المقام الأول على الادعاء التجريبي بالنجاح التنبؤي المثبت. تم الكشف عن العديد من نقاط الضعف في منهجية VAN، وفي عام 2011 خلصت اللجنة الدولية للتنبؤ بالزلازل من أجل الحماية المدنية إلى أن قدرة التنبؤ التي تطالب بها VAN لا يمكن التحقق من صحتها.

يعتبر معظم علماء الزلازل أن VAN قد جرى «فضحها بشكل مدو». ومن ناحية أخرى، ينتهي قسم مقدمات الزلازل والتنبؤ بها من (موسوعة جيوفيزياء الأرض الصلبة: جزء من سلسلة موسوعة علوم الأرض) على النحو التالي: «المجال الزمني 'الوقت الطبيعي'، يمكن تحديد النهج المتبع في الحالة الحرجة بوضوح. وبهذه الطريقة، يبدو أنهم نجحوا في تقليل المهلة الزمنية للتنبؤ بـ VAN إلى بضعة أيام فقط. وهذا يعني أن البيانات الزلزالية قد تؤدي دوراً مذهباً على المدى القصير عند دمجها مع بيانات SES».





منذ عام 2001، قدم فريق VAN مفهوماً يسمونه 'الوقت الطبيعي'، والذي أمكن تطبيقه على تحليل أسلافهم. في البداية يجري تطبيقه على SES لتمييزها عن الضوضاء وربطها بزلزال وشيك محتمل.

في حالة التحقق (أي لدى التصنيف على أنه «نشاط SES»)، يطبق تحليل الوقت الطبيعي بالإضافة إلى ذلك على النشاط الزلزالي اللاحق العام للمنطقة المرتبطة بنشاط SES، من أجل تحسين المعلمة الزمنية للتنبؤ. تتعامل هذه الطريقة مع بداية الزلزال كظاهرة حرجة. تشير مراجعة طريقة VAN المحدثه في عام 2020 إلى أنها تعاني من وفرة من الإيجابيات الكاذبة ومن ثم لا يمكن استخدامها كبروتوكول للتنبؤ. أجابت مجموعة VAN من خلال تحديد سوء الفهم في المنطق المحدد.

• شذوذ كوراليتوس

من المحتمل أن الحدث الزلزالي الكهرومغناطيسي الأكثر شهرة على الإطلاق، وأحد الأمثلة الأكثر ذكراً لسلائف الزلازل المحتملة، هو شذوذ كوراليتوس Corralitos Anomaly عام 1989. في الشهر السابق لزلزال لوما بريتا عام 1989، بدأت قياسات المجال المغناطيسي للأرض عند ترددات منخفضة جداً بواسطة مقياس المغناطيسية في كوراليتوس، كاليفورنيا، على بعد 7 كيلومترات فقط من مركز الزلزال الوشيك، تظهر زيادات شاذة في السعة.

وقبل ثلاث ساعات فقط من وقوع الزلزال، ارتفعت القياسات إلى نحو ثلاثين مرة أكبر من المعتاد، مع تضاؤل الساعات بعد الزلزال. ولم تجر رؤية مثل هذه الساعات خلال عامين من التشغيل، ولا في جهاز مماثل يقع على بعد 54 كم. بالنسبة لكثير من الناس، تشير هذه المكانية الواضحة في الزمان والمكان إلى وجود ارتباط بالزلزال.





جرى نشر أجهزة قياس مغناطيسية إضافية في وقت لاحق عبر شمال وجنوب كاليفورنيا، ولكن بعد **عشر سنوات** والعديد من الزلازل الكبيرة، لم يجر ملاحظة إشارات مماثلة. وقد أُلقت دراسات أحدث ظلالاً من الشك على هذا الارتباط، وأرجعت إشارات **كوراليتوس** إما إلى اضطراب مغناطيسي غير ذي صلة، أو ببساطة إلى خلل في نظام الاستشعار.

• فيزياء فرويند

في تحقيقاته في الفيزياء البلورية، وجد **فريدمان فرويند** أن جزيئات الماء الموجودة في الصخور يمكن أن تنفصل إلى أيونات إذا كانت الصخور تحت ضغط شديد. يمكن لحاملات الشحن الناتجة توليد تيارات البطارية في ظل ظروف معينة.

اقترح فرويند أنه ربما تكون هذه التيارات مسؤولة عن سلائف الزلازل مثل الإشعاع الكهرومغناطيسي وأضواء الزلازل واضطرابات البلازما في الغلاف الأيوني. وتعرف دراسة مثل هذه التيارات والتفاعلات باسم «**فيزياء فرويند**» **Freund Physics**.

يرفض معظم علماء الزلازل اقتراح **فرويند** بأن الإشارات المتولدة عن الإجهاد يمكن اكتشافها واستخدامها كمقدمات، وذلك لعدد من الأسباب. أولاً، يُعتقد أن الإجهاد لا يتراكم بسرعة قبل حدوث زلزال كبير، ومن ثم لا يوجد سبب لتوقع توليد تيارات كبيرة بسرعة.

ثانياً، قام **علماء الزلازل** بالبحث على نطاق واسع عن السلائف الكهربائية الموثوقة إحصائياً، باستخدام أجهزة متطورة، ولم يتعرفوا على أي من هذه السلائف. وثالثاً، فإن الماء الموجود في القشرة الأرضية من شأنه أن يتسبب في امتصاص أي تيارات متولدة قبل وصولها إلى السطح.





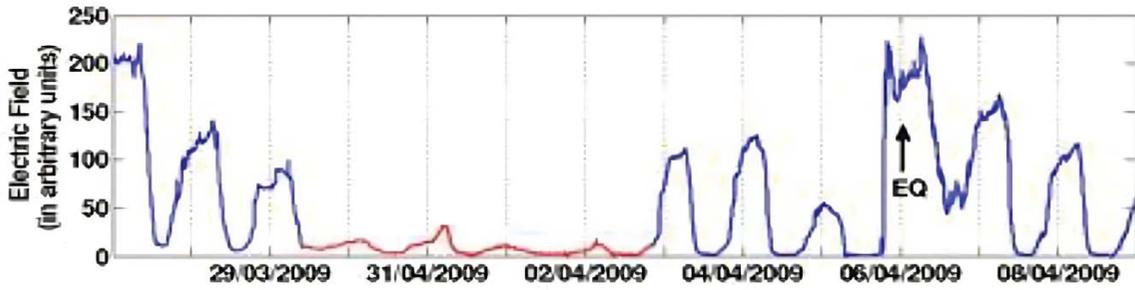
• اضطراب الدورة اليومية للأيونوسفير

عادةً ما يطوّر الأيونوسفير طبقته السفلى **D** خلال النهار، بينما تختفي هذه الطبقة ليلاً حيث تتحول البلازما هناك إلى غاز. أثناء الليل، تظل الطبقة **F** من الأيونوسفير متشكلة، على ارتفاع أعلى من الطبقة **D**. يجري تشكيل دليل موجي للترددات الراديوية ذات التردد العالي المنخفض حتى **10** ميغاهرتز أثناء الليل (انتشار الموجة السماوية) حيث تعكس الطبقة **F** هذه الموجات مرة أخرى إلى الأرض. تُفقد الموجة السماوية خلال النهار، حيث تمتص الطبقة **D** هذه الموجات. يُزعم أن الضغوط التكتونية في القشرة الأرضية تسبب موجات من الشحنات الكهربائية التي تنتقل إلى سطح الأرض وتؤثر على الغلاف الأيوني.

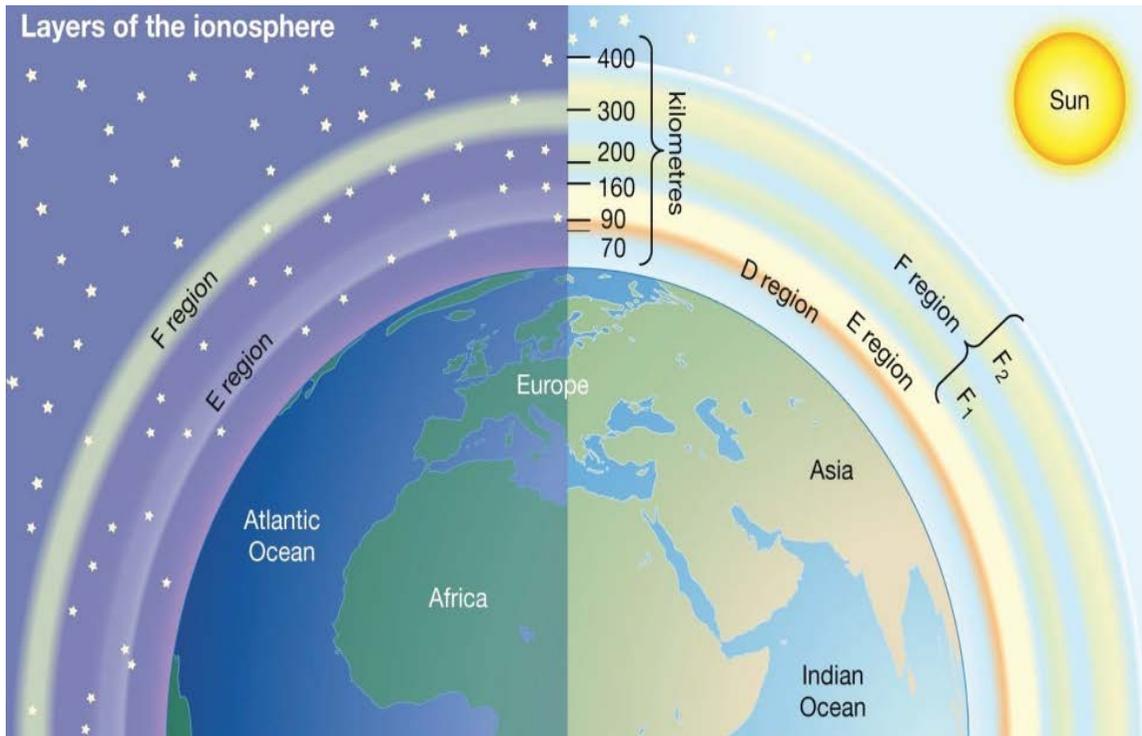
تشير تسجيلات التردد المنخفض جداً **ULF* Ultra Low Frequency** للدورة اليومية للغلاف الأيوني إلى أن الدورة المعتادة يمكن أن تتعطل قبل أيام قليلة من وقوع زلزال قوي ضحل. عند حدوث الاضطراب، يُلاحظ إما أن الطبقة **D** تُفقد أثناء النهار مما يؤدي إلى ارتفاع الأيونوسفير وتكوين الموجة الأيونوسفيرية، أو تظهر الطبقة **D** ليلاً مما يؤدي إلى انخفاض الأيونوسفير ومن ثم غياب الموجة السماوية.

طورت المراكز العلمية شبكة من أجهزة إرسال واستقبال الترددات المنخفضة جداً (**VLF**) على نطاق عالمي، والتي تكتشف التغيرات في الموجات السماوية. كما أن كل جهاز استقبال هو جهاز إرسال تعاقبي لمسافات تتراوح بين **1000 - 10000** كيلومتر ويعمل على ترددات مختلفة داخل الشبكة. يمكن تحديد المساحة العامة تحت الإثارة اعتماداً على كثافة الشبكة.





تسجيل ULF* لاحتفاظ الطبقة D من الغلاف الأيوني الذي يمتص الإشعاع الكهرومغناطيسي خلال الليالي التي سبقت زلزال لاكويلا بإيطاليا في 2009/4/6. يشار إلى الشذوذ باللون الأحمر.



تصنيف طبقات الغلاف الأيوني





ومن ناحية أخرى، تبين أن الأحداث المتطرفة العالمية مثل العواصف المغناطيسية أو التوهجات الشمسية والأحداث المتطرفة المحلية في نفس مسار الترددات المنخفضة جداً مثل زلزال آخر أو ثوران بركان يحدث في وقت قريب مع الزلزال قيد التقييم تجعل من الصعب أو المستحيل الربط بينها وبين التغييرات في موجة السماء **Skywave** للزلازل.

في عام 2017، أظهر مقال في مجلة الأبحاث الجيوفيزيائية أن العلاقة بين شذوذات الغلاف الأيوني والأحداث الزلزالية الكبيرة ($M \geq 6.0$) التي تحدث عالمياً في الفترة من 2000 إلى 2014 كانت مبنية على وجود الطقس الشمسي. عندما تجري إزالة البيانات الشمسية من السلسلة الزمنية، فإن الارتباط لم يعد ذا دلالة إحصائية.

يُظهر مقال لاحق في فيزياء الأرض والكواكب الداخلية في عام 2020 أن الطقس الشمسي واضطرابات الغلاف الأيوني هي سبب محتمل لإثارة زلازل كبيرة بناءً على هذه العلاقة الإحصائية. الآلية المقترحة هي الحث الكهرومغناطيسي من طبقة الأيونوسفير إلى منطقة الصدع. مواع الصدع موصلة، ويمكن أن تنتج تيارات تلورية **Telluric Currents** في العمق.

يؤدي التغير الناتج في المجال المغناطيسي المحلي في الصدع إلى تحلل المعادن وإضعاف الصخور، مع احتمالية تغيير كيمياء المياه الجوفية ومستواها أيضاً. بعد الحدث الزلزالي، قد تترسب معادن مختلفة مما يؤدي إلى تغيير كيمياء المياه الجوفية ومستواها مرة أخرى. وقد لوحظت عملية انحلال المعادن وهطول الأمطار قبل وبعد الزلزال في أيسلندا. هذا النموذج منطقي لبيانات الغلاف الأيوني والزلزالي والمياه الجوفية.





• الرصد الفضائي للانخفاض المتوقع في درجة حرارة الأرض

تتمثل إحدى طرق اكتشاف حركة الضغوط التكتونية في اكتشاف درجات الحرارة المرتفعة محلياً على سطح القشرة المقاسة بواسطة الأقمار الصناعية. أثناء عملية التقييم، تتم إزالة خلفية التباين اليومي والضوضاء الناجمة عن الاضطرابات الجوية والأنشطة البشرية قبل تصور تركيز الاتجاهات في المنطقة الأوسع للصدع. وقد تم تطبيق هذه الطريقة تجريبياً منذ عام 1995.

وفي نهج أحدث لشرح هذه الظاهرة، اقترح **فريدمان فرويند** من وكالة ناسا أن الأشعة تحت الحمراء التي تلتقطها الأقمار الصناعية لا ترجع إلى زيادة حقيقية في درجة حرارة سطح القشرة.

وفقاً لهذا الإصدار، فإن الانبعاث هو نتيجة للإثارة الكمومية التي تحدث عند إعادة الترابط الكيميائي لحاملات الشحنة الموجبة (الثقوب) التي تنتقل من أعماق الطبقات إلى سطح القشرة بسرعة **200 متر** في الثانية.

تنشأ الشحنة الكهربائية نتيجة زيادة الضغوط التكتونية مع اقتراب وقت الزلزال. يمتد هذا الانبعاث سطحياً حتى **500 × 500 كيلومتر** مربع في الأحداث الكبيرة جداً ويتوقف تقريباً بعد وقوع الزلزال مباشرة.





• اتجاهات

بدلاً من مراقبة الظواهر الشاذة التي قد تكون علامات تمهيدية لزلزال وشيك، تبحث الأساليب الأخرى للتنبؤ بالزلازل عن الاتجاهات **Trends** أو الأنماط التي تؤدي إلى حدوث زلزال.

وبما أن هذه الاتجاهات قد تكون معقدة وتتضمن العديد من المتغيرات، فغالباً ما تكون هناك حاجة إلى تقنيات إحصائية متقدمة لفهمها، ولذلك تسمى أحياناً الأساليب الإحصائية. وتميل هذه الأساليب أيضاً إلى أن تكون أكثر احتمالية، وأن تكون لها فترات زمنية أطول، ومن ثم تندمج في التنبؤ بالزلازل.

• البث الآني

التنبؤ الآني بالزلازل، المقترح في عام 2016، هو تقدير للحالة الديناميكية الحالية لنظام رصد الزلازل، استناداً إلى التوقيت الطبيعي الذي جرى تقديمه في عام 2001. وهو يختلف عن التنبؤ الذي يهدف إلى تقدير احتمالية وقوع حدث مستقبلي ولكنه يعتبر أيضاً قاعدة محتملة لـ التوقع.

تنتج حسابات التنبؤ الآني «النتيجة المحتملة للزلزال» **Earthquake Potential Score**، وهي تقدير للمستوى الحالي للتقدم الزلزالي. التطبيقات النموذجية هي: الزلازل العالمية الكبرى والتسونامي، والهزات الارتدادية والزلازل المستحثة، والزلازل المستحثة في حقول الغاز، والمخاطر الزلزالية على المدن الكبرى العالمية، ودراسة تجمع الزلازل العالمية الكبيرة، وما إلى ذلك.



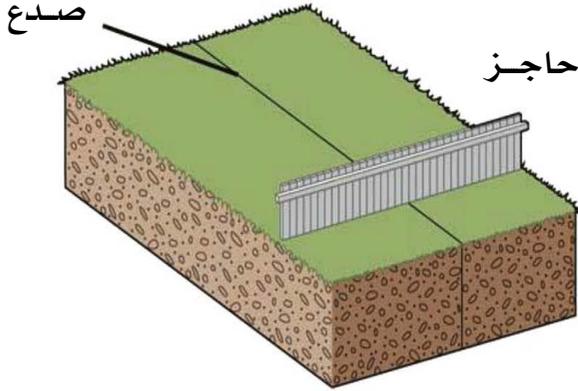


• الارتداد المرن

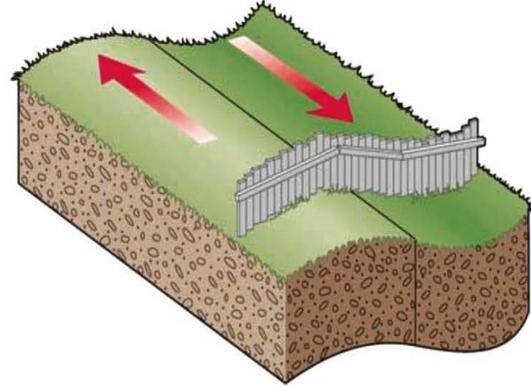
بعد زلزال سان فرانسيسكو العظيم عام 1906، فحص الجيوفيزيائي هاري فيلدنغ ريد Reid إزاحة سطح الأرض على طول صدع سان أندرياس في الخمسين عاماً التي سبقت الزلزال. وجد أدلة على الانحناء 3.2 أمتار خلال تلك الفترة. وخلص إلى أن الزلزال يجب أن يكون نتيجة الارتداد المرن لطاقة الإجهاد المخزنة في الصخور على جانبي الصدع.

لقد أشار العالم ريد Reid عام 1906م إلى أن نظرية الارتداد المرن Elastic Rebound تعطي تفسيراً معقولاً لأسباب حدوث الزلازل، وتفترض هذه النظرية أن صخور القشرة الأرضية تتعرض إلى ضغوط وتشوهات على مدار السنين مما يجعل مسارها الطبيعي يتغير وينتج عن ذلك قوى هائلة تتزايد مع الزمن، فإذا زادت هذه القوى عن قدرة تحمل الصخور حدث بها كسر أو شرخ أو بمعنى آخر إذا زادت القوى الناتجة عن قوى الاحتكاك بين الصخور تحدث الإزاحة على جانبي الفالق مسببة انطلاق الطاقة المحبوسة إما على هيئة حرارة إما موجات ارتدادية، وهذه الموجات الارتدادية التي يحاول بها الصخر الرجوع إلى وضعه الطبيعي هي التي تسبب الزلازل.

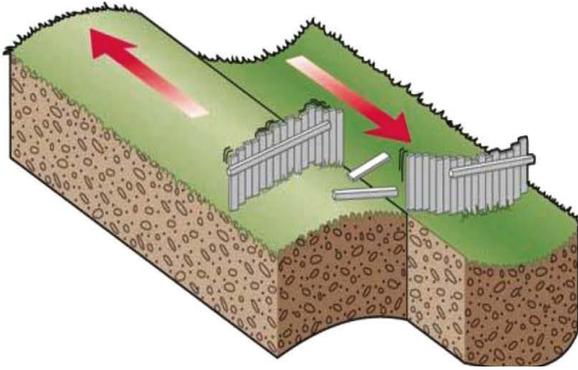




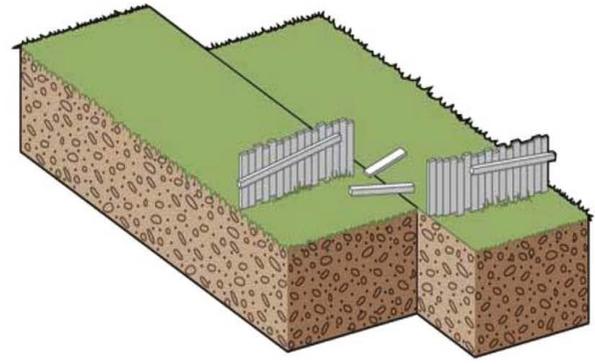
الوضع الأصلي



التشوه



مرحلة التمزق وانطلاق الطاقة



رجوع الصخر إلى الوضع الأصلي قبل التشوه

مبدأ نظرية الارتداد المرن. بسبب الاحتكاك، لا تنزلق الكتل، لكنها تتشوه. عندما تتجاوز الضغوط داخل الصخور قوة الاحتكاك، يحدث التمزق. بعدها يتم انطلاق الطاقة المرنة المخزنة في النظام بعد تمزقها على شكل موجات تشع إلى الخارج من الصدع.





• الزلازل المميزة

يبدو أن الصدوع الزلزالية الأكثر دراسة (مثل صدع نانكاي، وصدع واساتش، وصدع سان أندرياس) لها أجزاء متميزة. ويفترض نموذج الزلازل المميز أن الزلازل تكون مقيدة بشكل عام ضمن هذه الأجزاء. وبما أن أطوال القطع وخصائصها الأخرى ثابتة، فإن الزلازل التي تمزق الصدع بكامله يجب أن تكون لها خصائص مماثلة.

وتشمل هذه الحد الأقصى للقدر (الذي يقتصر على طول التمزق)، وكمية الإجهاد المتراكم اللازم لتمزق جزء الصدع. وبما أن حركات الصفائح المستمرة تتسبب في تراكم الضغط بشكل مطرد، فإن النشاط الزلزالي على جزء معين يجب أن يهيمن عليه زلازل ذات خصائص مماثلة تتكرر على فترات منتظمة إلى حد ما.

بالنسبة لجزء صدع معين، فإن تحديد هذه الزلازل المميزة وتوقيت معدل تكرارها (أو على العكس من فترة العودة) يجب أن يعلمنا بالتمزق التالي؛ وهذا هو النهج المستخدم عمومًا في التنبؤ بالمخاطر الزلزالية. يعد **UCERF3** مثالاً بارزاً على مثل هذه التوقعات، والتي جرى إعدادها لولاية كاليفورنيا.

تُستخدم فترات العودة أيضاً للتنبؤ بالأحداث النادرة الأخرى، مثل الأعاصير والفيضانات، وتفترض أن التكرار المستقبلي سيكون مشابهاً للتكرار المرصود حتى الوقت الحالي.

كانت فكرة الزلازل المميزة هي أساس تنبؤ **باركفيلد**: الزلازل المماثلة إلى حد ما في **1857، 1881، 1901، 1922، 1934، و1966** تشير إلى نمط من الانقطاعات





كل **21.9 سنة**، مع انحراف معياري قدره ± 3.1 سنة. أدى الاستقراء من حدث **عام 1966** إلى التنبؤ بحدوث زلزال نحو **عام 1988**، أو قبل **عام 1993** على أبعد تقدير (عند فترة ثقة 95%).

جاذبية مثل هذه الطريقة هي أن التنبؤ مستمد بالكامل من الاتجاه، الذي يفترض أنه يفسر فيزياء الزلازل المجهولة وربما غير المعروفة ومعالم الصدع. ومع ذلك، في حالة باركفيلد، لم يحدث الزلزال المتوقع حتى **عام 2004**، أي بعد عقد من الزمن.

وهذا يقوض بشكل خطير الادعاء بأن الزلازل في باركفيلد شبه دورية، ويشير إلى أن الأحداث الفردية تختلف بما فيه الكفاية في جوانب أخرى للتساؤل عما إذا كانت لها خصائص مشتركة مميزة.

أثار فشل تنبؤات باركفيلد الشك في صحة نموذج الزلازل المميز نفسه. شككت بعض الدراسات في الافتراضات المختلفة، بما في ذلك الافتراض الرئيسي القائل بأن الزلازل مقيدة ضمن أجزاء، واقتُرحت أن «الزلازل المميزة» قد تكون نتيجة للتحيز في الاختيار وقصر السجلات الزلزالية (بالنسبة لدورات الزلازل).

وقد نظرت دراسات أخرى فيما إذا كانت هناك عوامل أخرى تحتاج إلى النظر فيها، مثل عمر الصدع. سواء كانت تمزقات الزلازل مقيدة بشكل عام داخل جزء ما (كما يُرى غالباً)، أو تجاوزت حدود الجزء (كما يُرى أيضاً)، فإن لها تأثيراً مباشراً على درجة خطر الزلزال: الزلازل تكون أكبر عندما تتكسر أجزاء متعددة، ولكن في تخفيف المزيد سلالة أنها سوف تحدث في كثير من الأحيان أقل.





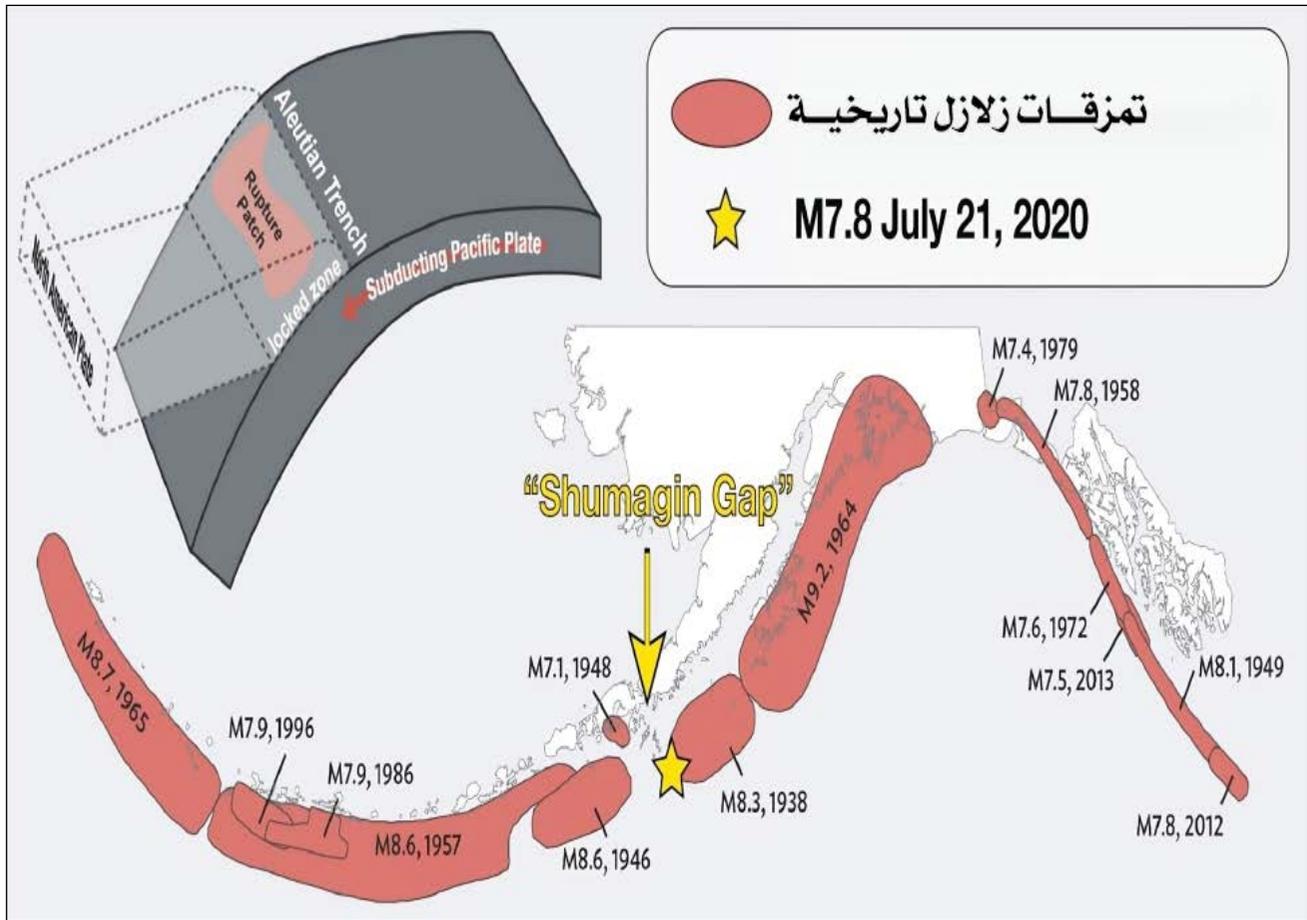
• الفجوات الزلزالية

عند نقطة الاتصال حيث تتزلق الصفائح التكتونية فوق بعضها بعضاً، يجب أن ينزلق كل قسم في النهاية، حيث (على المدى الطويل) لن تترك أيًا منها وراءها. لكنها لا تتزلق كلها في الوقت نفسه؛ ستكون الأقسام المختلفة في مراحل مختلفة في دورة تراكم الإجهاد (التشوه) والارتداد المفاجئ.

في نموذج الفجوة الزلزالية **Seismic Gap**، ينبغي توقع «الزلازل الكبيرة اللاحق» ليس في الأجزاء التي خففت فيها الزلازل الأخيرة الضغط، ولكن في الفجوات المتداخلة حيث يكون الضغط غير المخفف هو الأكبر. يتمتع هذا النموذج بجاذبية بديهية؛ يجري استخدامه في التنبؤ طويل المدى، وكان أساساً لسلسلة من التنبؤات حول المحيط الهادئ (أي المناطق المطلة على المحيط الهادئ) في عامي 1979 و1989-1991.

ومع ذلك، فمن المعروف حالياً أن بعض الافتراضات الأساسية حول الفجوات الزلزالية غير صحيحة. ويشير الفحص الدقيق إلى أنه «قد لا تكون هناك معلومات في الفجوات الزلزالية حول وقت حدوث أو قدر الحدث الكبير التالي في المنطقة»؛ تُظهر الاختبارات الإحصائية للتنبؤات المحيطة بالمحيط الهادئ أن نموذج الفجوة الزلزالية «لم يتنبأ بالزلازل الكبيرة بشكل جيد». وخلصت دراسة أخرى إلى أن فترة الهدوء الطويلة لم تزد من احتمال وقوع الزلازل.





نمط الضجوات الزلزالية



• الأنماط الزلزالية

جرى تطوير خوارزميات مختلفة مشتقة إرشادياً للتنبؤ بالزلازل. ربما تكون عائلة **الخوارزميات M8** هي الأكثر شهرة (بما في ذلك طريقة **RTP**) التي أمكن تطويرها تحت قيادة **فلاديمير كيليس بوروك**. يصدر **M8** إنذار «وقت زيادة الاحتمال» **Time of Increased Probability (TIP)** لزلزال كبير بقوة محددة عند مراقبة أنماط معينة من الزلازل الأصغر.

تغطي أوقات زيادة الاحتمال عمومًا مساحات كبيرة (يصل عرضها إلى **ألف كيلومتر**) لمدة تصل إلى **خمس سنوات**. مثل هذه المعالم الكبيرة جعلت **M8** مثيرة للجدل، حيث إنه من الصعب تحديد ما إذا كانت أي ضربات حدثت قد جرى التنبؤ بها بمهارة، أم أنها نتيجة الصدفة فقط.

اكتسبت **M8** اهتمامًا كبيرًا عندما وقعت زلازل سان **سيميون** و **هوكايدو عام 2003** داخل منطقة **TIP**. في عام **1999**، نشرت مجموعة **كيليس-بوروك** ادعاءً بأنها حققت نتائج متوسطة المدى ذات دلالة إحصائية باستخدام نماذج **M8** و **MSc**، فيما يتعلق بالزلازل الكبيرة في جميع أنحاء العالم.

ومع ذلك، يشكك جيلر وآخرون في ادعاءات التنبؤ على مدى أي فترة أقل من **30 عامًا**. لم يتم تنفيذ نصيحة نُشرت على نطاق واسع لزلزال بقوة **6.4 درجة** في جنوب كاليفورنيا في عام **2004**، ولا نصيحتين أخريين أقل شهرة.

وجدت دراسة عميقة لطريقة **RTP** في عام **2008** أنه من بين نحو عشرين إنذارًا، يمكن اعتبار اثنين فقط من الإنذارات نتيجة (واحتمال حدوث أحدهما





على أي حال هو 60%). وخلصت إلى أن «RTP لا يختلف كثيراً عن طريقة التخمين الساذجة بناءً على المعدلات التاريخية للزلازل».

يعتمد إطلاق اللحظة المتسارعة (AMR، 'اللحظة' عبارة عن قياس للطاقة الزلزالية)، والمعروف أيضاً باسم تحليل الوقت حتى الفشل، أو إطلاق اللحظة الزلزالية المتسارعة (ASMR) Accelerating Seismic Moment Release، على أرصادٍ تشير إلى أن نشاط الهزات قبل وقوع زلزال كبير لم تزد فقط، وإنما زادت بمعدل أسي. وبعبارة أخرى، فإن مخطط العدد التراكمي للهزات النذيرة يصبح أكثر حدة قبل الصدمة الرئيسية مباشرة.

بعد صياغة بومان وآخرين (1998) إلى فرضية قابلة للاختبار، وعدد من التقارير الإيجابية، بدت نظرية (إطلاق اللحظة المتسارعة AMR) واعدة مع وجود العديد من المشكلات. تضمنت المشكلات المعروفة عدم اكتشاف جميع المواقع والأحداث، وصعوبة توقع وقت حدوث دقيق عندما تصبح نهاية المنحنى شديدة الانحدار.

لكن الاختبارات الصارمة أظهرت أن اتجاهات إطلاق اللحظة المتسارعة الواضحة من المحتمل أن تنتج عن كيفية إجراء مطابقة البيانات، والفشل في حساب التجمعات الزمانية المكانية للزلازل. ومن ثم فإن اتجاهات إطلاق اللحظة المتسارعة ليست ذات أهمية إحصائية. لقد انخفض الاهتمام بنظرية إطلاق اللحظة المتسارعة (وفقاً لعدد الأوراق البحثية الخاضعة لمراجعة النظراء) منذ

عام 2004.





• التعلم الآلي

أفاد **روت ليدوك وآخرون (2019)** بأنه نجح في تدريب غابة عشوائية انحدارية على بيانات السلاسل الزمنية الصوتية القادرة على تحديد الإشارة المنبعثة من مناطق الصدع التي تتبأ بفشل الصدع. اقترح روت ليدوك وآخرون (2019) أن الإشارة المحددة، التي كان يُفترض سابقاً أنها ضوضاء إحصائية، تعكس الانبعاث المتزايد للطاقة قبل إطلاقها المفاجئ أثناء حدث الانزلاق.

وقد افترض **روت ليدوك وآخرون (2019)** أيضاً أن نهجهم يمكن أن يربط أوقات فشل الصدع ويؤدي إلى تحديد إشارات أخرى غير معروفة. ونظراً لندرة الزلازل الأكثر كارثية، فإن الحصول على بيانات تمثيلية لا يزال يمثل مشكلة. رداً على ذلك، توقع **روت ليدوك وآخرون (2019)** أن نموذجهم لن يحتاج إلى التدريب على البيانات المستمدة من الزلازل الكارثية، حيث أظهرت الأبحاث الإضافية أن الأنماط الزلزالية المثيرة للاهتمام متشابهة في الزلازل الأصغر.

كما جرى تطبيق التعلم العميق على التنبؤ بالزلازل. مع أن قانون باث وقانون أوموري يصفان قدر الهزات الارتدادية للزلازل وخصائصها المتغيرة بمرور الوقت، فإن التنبؤ بـ «التوزيع المكاني للهزات الارتدادية» **Spatial Distributions of Earthquake Aftershocks** يبقى مشكلة بحثية مفتوحة. باستخدام مكتبات برامج **Theano** و **TensorFlow**، قام **ديفريز وآخرون (2018)** بتدريب شبكة عصبية حققت دقة أعلى في التنبؤ بالتوزيعات المكانية للهزات الارتدادية للزلازل مقارنة بالمنهجية المحددة مسبقاً لتغيير إجهاد فشل **Coulomb Failure Stress** **Change**.





والجدير بالذكر أن **ديفريز وآخرين (2018)** أفادوا أن نموذجهم لم يقدم «افتراضات حول اتجاه أو هندسة مستوى المستقبل» وقام بوزن التغيير في إجهاد القص بشكل كبير، «مجموع القيم المطلقة للمكونات المستقلة لموتر تغير الإجهاد **Stress-change Tensor**»، وعائد فون ميزس معيار **Von Mises Yield Criterion**. افترض **ديفريز وآخرون (2018)** أن اعتماد نموذجهم على هذه الكميات الفيزيائية يشير إلى أنهم قد «يتحكمون في إثارة الزلازل خلال الجزء الأكثر نشاطاً من الدورة الزلزالية». لاختبار التحقق من الصحة، حجز ديفريز وفريقه 10% من عينات بيانات الزلازل التدريبية الإيجابية وكمية متساوية من العينات السلبية المختارة عشوائياً.

وبالمثل، قام **أرنود ميجنان وماركو بروكاردو** بتحليل تطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بالزلازل. ووجدوا في مراجعة للأدبيات أن أبحاث التنبؤ بالزلازل باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية قد انجذبت نحو نماذج أكثر تطوراً وسط الاهتمام المتزايد بالمنطقة.

ووجدوا أيضاً أن الشبكات العصبية المستخدمة في التنبؤ بالزلازل بمعدلات نجاح ملحوظة جرت مطابقتها في الأداء من خلال نماذج أبسط. كما تناولوا قضايا الحصول على البيانات المناسبة لتدريب الشبكات العصبية على التنبؤ بالزلازل، وكتبوا أن «الطبيعة المنظمة والمجدولة لكتالوجات الزلازل» تجعل نماذج التعلم الآلي الشفافة مرغوبة أكثر من الشبكات العصبية الاصطناعية.





• النبضات الكهرومغناطيسية الناجمة عن الزلازل

يمكن للنبضات الكهرومغناطيسية **EMP** عالية الطاقة أن تسبب الزلازل خلال **2-6 أيام** بعد انبعاث مولدات النبضات الكهرومغناطيسية. لقد جرى اقتراح أن التأثيرات الكهرومغناطيسية القوية يمكن أن تتحكم في الزلازل، حيث تبدو ديناميكيات الزلازل التي تتبعها أكثر انتظاماً من المعتاد.

• صعب أم مستحيل

كان التفاؤل السائد في السبعينات بأن التنبؤ الروتيني بالزلازل سيكون «قريباً»، ربما في غضون عشر سنوات، وقد انتهى بشكل مخيب للأمال بحلول التسعينات، وبدأ العديد من العلماء يتساءلون عن السبب. بحلول **عام 1997**، جرى التأكيد بشكل إيجابي على أنه لا يمكن التنبؤ بالزلازل، مما أدى إلى نقاش ملحوظ في **عام 1999** حول ما إذا كان التنبؤ بالزلازل الفردية هدفاً علمياً واقعياً.

ربما يكون التنبؤ بالزلازل قد فشل فقط لأنه «صعب جداً» ولا يزال خارج نطاق الكفاءة العلمية الحالية. مع الإعلان الواثق قبل أربعة عقود من الزمن عن أن علم الزلازل كان «على وشك» تقديم تنبؤات موثوقة، إلا أنه قد يكون هناك تقليل من شأن الصعوبات.

في وقت مبكر من **عام 1978**، أُبلغ عن أن الانفجار الزلزالي قد يكون معقداً بسبب «التوزيع غير المتجانس للخواص الميكانيكية على طول الصدع»، وفي **عام 1986**، يبدو أن المخالفات الهندسية في سطح الصدع «تمارس ضوابط كبيرة





على بدء وإيقاف التمزقات». وأرجعت دراسة أخرى اختلافات كبيرة في السلوك الخاطئ إلى نضج الصدع. لا تنعكس هذه الأنواع من التعقيدات في طرق التنبؤ الحالية.

وربما يفتقر علم الزلازل حتى الوقت الحالي إلى الفهم الكافي لمفهومه الأكثر مركزية، ألا وهو نظرية الارتداد المرن. وجدت المحاكاة التي استكشفت الافتراضات المتعلقة بتوزيع الانزلاق نتائج «لا تتفق مع النظرة الكلاسيكية لنظرية الارتداد المرن». ويُعزى ذلك إلى تفاصيل عدم تجانس الصدع التي لم تؤخذ في الاعتبار في النظرية.

قد يكون التنبؤ بالزلازل مستحيلًا في حد ذاته. في عام 1997، قيل إن الأرض في حالة حرجة ذاتية التنظيم «حيث يكون لأي زلزال صغير احتمالية أن يتحول إلى حدث كبير». وقد قيل أيضًا على أساس نظرية القرار إن «التنبؤ بالزلازل الكبرى أمر مستحيل بأي معنى عملي».

في عام 2021، أفاد عدد كبير من المؤلفين من مجموعة متنوعة من الجامعات والمعاهد البحثية التي تدرس القمر الصناعي للزلازل الكهرومغناطيسية أن الادعاءات المستندة إلى الحرجية ذاتية التنظيم والتي تنص على أنه في أي لحظة يمكن لأي زلزال صغير أن يتحول في النهاية إلى حدث كبير، لا الوقوف في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها حتى الوقت الحالي عن طريق تحليل الوقت الطبيعي.

إن فكرة أن التنبؤ بالزلازل قد يكون مستحيلًا في جوهره كانت موضع جدل قوي، ولكن أفضل دليل على استحالة - التنبؤ الفعال بالزلازل - لم يجر إثباته بعد.





تدابير التخفيف من أضرار الزلازل في الوقت الحقيقي

يشير التخفيف من أضرار الزلازل في الوقت الفعلي إلى ممارسة نحدد من خلالها بسرعة فور حدوث زلزال كبير معالم المصدر والتوزيع المقدر لشدة الاهتزاز وتوزيع المعلومات على مختلف المستخدمين.

يشمل المستخدمون مسؤولي خدمات الطوارئ، وشركات المرافق (الكهرباء، والمياه، والغاز، والهاتف، وغيرها)، وخدمات النقل، ووسائل الإعلام، والجمهور. ستكون هذه المعلومات مفيدة للحد من تأثير الزلزال المدمر على مجتمعنا.

في معظم الحالات، تستغرق معالجة البيانات بضع دقائق إلى ساعات، وعندما تصل المعلومات إلى المستخدمين، قد يكون الضرر قد حدث بالفعل في موقع المستخدم. وفي هذه الحالة، تسمى المعلومات معلومات ما بعد الزلزال. هذه المعلومات مهمة لعمليات الاسترداد المنظمة في المناطق المتضررة.

في المقابل، إذا كان من الممكن إجراء معالجة البيانات ونقل المعلومات بسرعة كبيرة (أي خلال 10 ثوانٍ)، فإن المعلومات تصل إلى بعض المواقع قبل أن يبدأ الاهتزاز هناك. في هذه الحالة، تسمى المعلومات «الإنذار المبكر بالزلازل» (EEW).

وهذا المفهوم موجود منذ أكثر من 100 عام، ولكن لم يجر تطبيقه إلا في الآونة الأخيرة لصعوبات فنية وعملية. في اليابان، بالتزامن مع تشغيل القطار فائق السرعة (شينكانسن Shinkansen) في ستينات القرن الماضي، طُبِقَ نظام تحذير من اهتزاز الأرض الوشيك بعد وقوع زلزال كبير قريب. وجرى توسيع هذا النظام لاحقاً ليشمل UrEDAS الذي قاد التطورات اللاحقة لمنهجية الإنذار المبكر بالزلازل لأغراض أكثر عمومية.





• معلومات ما بعد الزلزال والإنذار المبكر بالزلازل

أمكن إصدار معلومات ما بعد الزلزال بشكل روتيني من قبل منظمات مختلفة مثل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) ووكالة الأرصاد الجوية اليابانية (JMA)، واستخدمت على نطاق واسع.

وفي كاليفورنيا، بدأ مشروع لتوزيع معلومات ما بعد الزلزال على مختلف المستخدمين في التسعينات. أطلق على هذا المشروع اسم CUBE (بث الزلازل من Caltech-USGS) ويهدف ليس فقط إلى توزيع معلومات الزلازل ولكن أيضاً إلى تحسين التواصل بين مقدمي المعلومات (مثل الجامعات والوكالات الحكومية) والمستخدمين. وقد ورثت ShakeMap روح هذا المشروع، وهي عبارة عن خريطة توضح توزيع معالم الحركة الأرضية والتي يجري إنتاجها تلقائياً خلال بضع دقائق إلى ساعة بعد وقوع زلزال كبير.

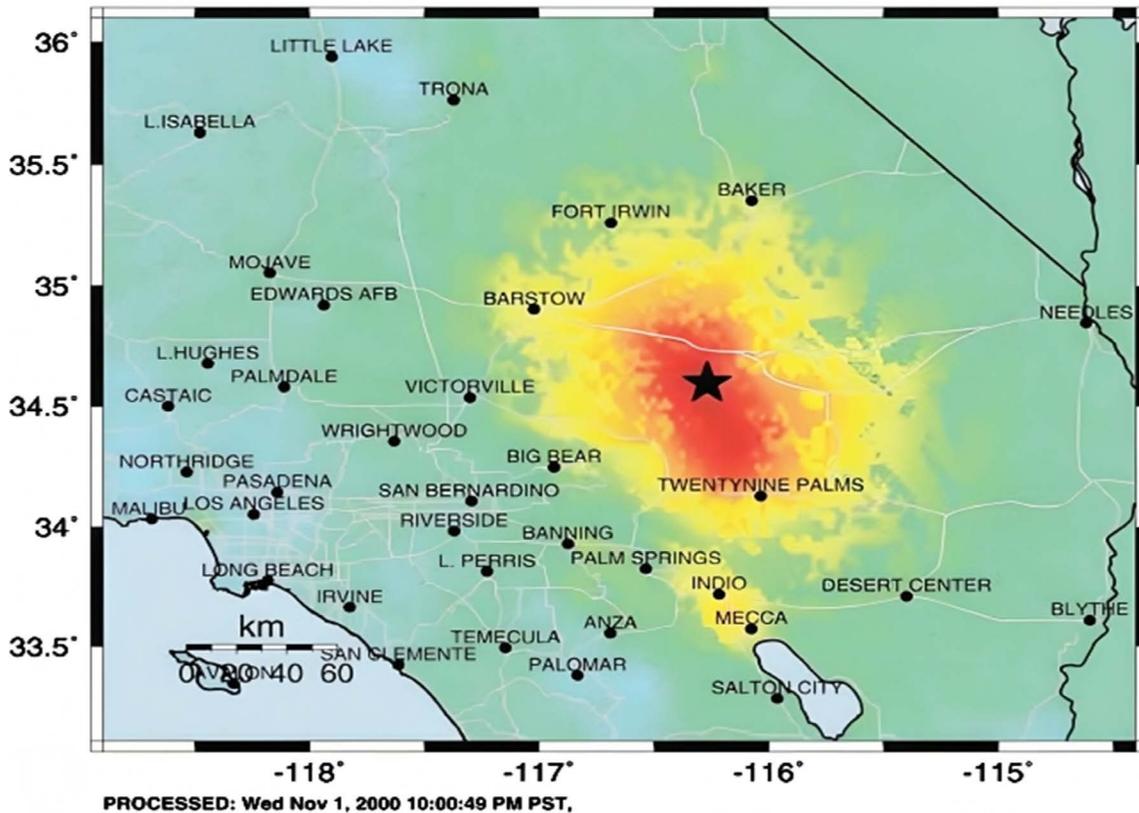
في الوقت الحاضر، تُستخدم ShakeMap على نطاق واسع من قبل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية والوكالات الأخرى كمعلومات أساسية لاتخاذ تدابير الطوارئ بعد وقوع زلزال مدمر. حتى يكون هذا النوع من المعلومات مفيداً، من المهم أن يكون هناك تفاعل وثيق بين مقدمي الخدمة والمستخدمين. الاتصالات ذات الاتجاه الواحد لها فائدة محدودة فقط.

في مشروع CUBE، أمكن تعزيز التفاعل من خلال اجتماعات مجدولة بانتظام لمناقشة الاستخدام الفعال للمعلومات في الوقت الفعلي، وفي حالة حدوث زلازل كبيرة، يقدم ردود الفعل من المستخدمين فيما يتعلق بمدى دقة وسرعة وفعالية إرسال المعلومات إلى المستخدمين وكيف استخدم المعلومات فعلياً في عمليات الطوارئ. كانت هذه التعليقات مهمة جداً لتطوير CUBE.





إن التقدم السريع في ممارسات رصد الزلازل الحديثة، ومعالجة المعلومات، وقياس البيانات عن بعد في السنوات الأخيرة، جعل من الممكن إنتاج معلومات مماثلة في غضون **ثوان** قليلة، بدلاً من بضع دقائق، بعد وقوع زلزال كبير.



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

ShakeMap لزلزال منجم هيكاتور (Mw=7.1، كاليفورنيا) عام 1999. تُظهر ShakeMap توزيع الكثافة المحسوب تلقائياً من حركة الأرض المرصودة، وعادةً ما يوزع على المستخدمين في غضون بضع دقائق إلى ساعة واحدة بعد وقوع الزلزال.





هذا التقدم جعل الإنذار المبكر بالزلازل هدفًا واقعيًا. حتى الوقت الحالي، تستخدم العديد من أنظمة الإنذار عمليًا في اليابان (**شينكانسن**) والمكسيك وتايوان. في اليابان، طوّرت أساليب مختلفة في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين في **JMA**، ومعهد البحوث الفنية للسكك الحديدية، والمعهد الوطني لأبحاث علوم الأرض والوقاية من الكوارث (**NIED**).

في **فبراير 2004**، دمجت هذه الأساليب وبدأت **JMA** في اختبار توزيع معلومات الإنذار المبكر على عدد محدود من المنظمات. ويبين الشكل الآتي نظام **REIS** (نظام معلومات الزلازل في الوقت الحقيقي) الذي جرى تطويره في **NIED**. وتعد هذه من بين الأنظمة الأكثر تطورًا والمصممة لأغراض التحذير العام من الزلازل. وفي الوقت الحاضر، يركز البحث على كيفية الاستفادة المثلى من معلومات الإنذار المبكر الصادرة عن هذه الأنظمة الحديثة. لا يزال من غير المعروف كيف ستعمل هذه الأنظمة في حالة الزلازل الكبيرة جدًا ذات أبعاد المصدر الكبيرة، والزلازل على مسافات قصيرة (أقل من **30 كم**)، ولكن هذا التطور جذب انتباه الجمهور إلى الاستخدام العملي للإنذار المبكر بالزلازل. على سبيل المثال، تقوم مجموعة بحثية في جامعة ناغويا بإجراء بحث نشط متعدد التخصصات حول الاستخدام العملي لمعلومات الإنذار المبكر بالزلازل. يعد النهج متعدد التخصصات الذي يشمل علماء الزلازل والمهندسين وعلماء الاجتماع وموظفي إدارة الطوارئ أمرًا بالغ الأهمية للتنفيذ الناجح لمعلومات الإنذار المبكر في المستقبل.





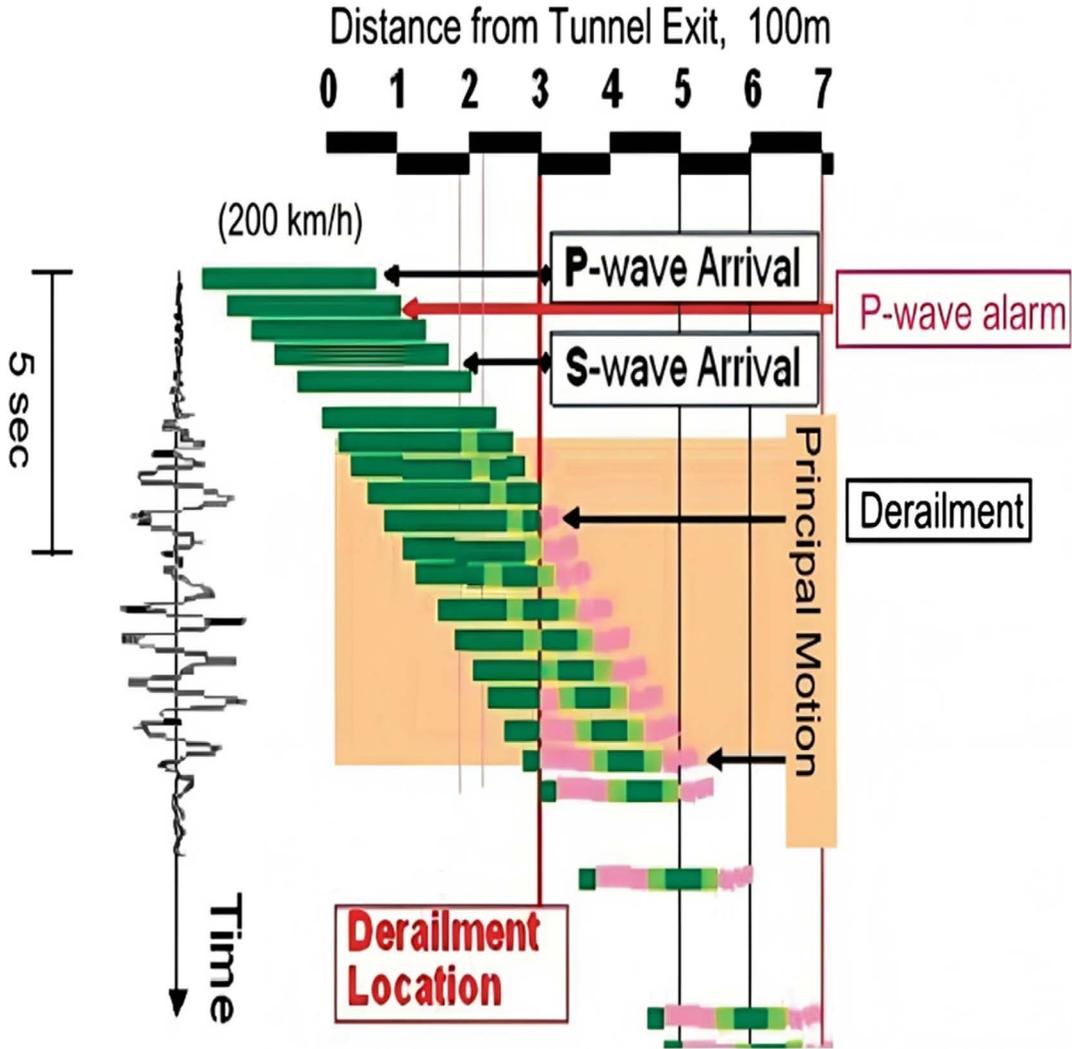
• التنفيذ والمشكلات المرتبطة به

وفيما يأتي، ندرج بعض الأمثلة الحديثة للاستخدام العملي لمعلومات الإنذار المبكر بالزلازل.

استخدم **UrEDAS** منذ فترة طويلة للتحكم في قطار السرعة الشينكانسن الياباني بعد وقوع زلزال كبير. أثناء زلزال **تشويتسو** الأخير في اليابان (23 أكتوبر 2004، Mw=6.6)، أصدر **UrEDAS** الموجود في المنطقة المركزية تحذيراً بعد ثانية واحدة من وصول الموجة **P** إلى الموقع، مما أدى إلى إيقاف تشغيل الطاقة وتفعيل حالة الطوارئ الفرامل على القطار الذي يتحرك بسرعة **200 كم/ساعة** بالقرب من مركز الزلزال. في هذه الحالة، خرج القطار في النهاية عن مساره (لم تقع إصابات) بعد بضع ثوانٍ، وقدمت بعض وسائل الإعلام تقارير سلبية إلى حد ما مفادها أن الإنذار المبكر كان فاشلاً. ومع ذلك، يبدو أن هذا الرأي يفتقد النقطة المهمة. ومن اللافت للنظر أن نظام الإنذار المبكر عمل كما ينبغي له في مثل هذا الوقت القصير. ليس المقصود من النظام منع الخروج عن المسار؛ إنه مصمم لإبطاء القطار لتقليل تأثير الحركة الأرضية القوية.

1. عرض موتوساكا وآخرون (2006) تجربة تتضمن مدرسة ابتدائية في سينداي، اليابان، لممارسة تمارين الطوارئ استجابة للإنذار المبكر للزلازل الذي سيصدره نظام **JMA**. في هذه المنطقة، من المعروف أن الزلازل التي تبلغ قوتها **7 درجات** (زلازل مياجي-أوكي) تحدث قبالة الشاطئ مرة كل **30 عاماً** تقريباً. وقد أوضح موتوساكا وآخرون (2006) مزايا مثل هذه التحذيرات للأحداث البحرية الكبيرة.





رسم تخطيطي يوضح كيفية عمل UrEDAS أثناء زلزال تشويتسو باليابان عام 2004 ($M_w=6.6$). تظهر مواقع القطار بواسطة أشرطة خضراء. يشير المحور الأفقي إلى المسافة من مخرج النفق والمحور الرأسي هو الوقت. يظهر مخطط الزلازل في موقع قريب من القطار على طول المحور الرأسي للإشارة إلى حركة الأرض. جرى إصدار إنذار بعد نحو ثانية واحدة من وصول الموجة P. لم تكن الحركة الأرضية كبيرة جداً في هذا الوقت، واستغرق الأمر بضع ثوانٍ إضافية قبل حدوث الحد الأقصى للحركة. تجري الإشارة إلى السيارات التي خرجت عن مسارها باللون الوردي.





2. يشير كندا وآخرون (2006) إلى استخدام نظام الإنذار المبكر JMA في موقع بناء مبنى شاهق في **يوكوهاما**. من أجل سلامة العمال في موقع البناء، عند تلقي تحذير مبكر من وقوع زلزال في الموقع، يجري إخطار العمال على الفور بإمكانية حدوث حركة أرضية قوية وشيكة حتى يتمكنوا من اتخاذ تدابير السلامة المناسبة مثل إيقاف المصاعد في أقرب طابق ووضع الرافعات البرجية في وضع آمن.

بالإضافة إلى العديد من المشكلات الفنية، تعد الموثوقية الشاملة وتأثير الإنذارات الكاذبة والإنذارات الفائتة والمسؤولية المرتبطة بها من بين القضايا التي تجري مناقشتها بقوة هذه الأيام.

وغني عن القول إن هذه القضايا مهمة، ولكن في الوقت الحاضر، حيث لا يوجد الكثير من أنظمة الإنذار المبكر قيد التشغيل، فمن الصعب إلى حد ما فهم فائدتها بشكل كامل. ربما يكون الأمر الأكثر أهمية في هذه المرحلة هو اكتساب المزيد من الخبرة من خلال اختبار أنظمة الوقت الفعلي المختلفة للتطبيقات العملية.

نظراً لأننا نحتاج إلى التعامل مع عمليات الزلازل المعقدة وحتى المشكلات المجتمعية الأكثر تعقيداً، فسيكون من المحتم أن نواجه بعض الصعوبات المرتبطة بالإنذارات الكاذبة والإنذارات الفائتة والاستجابات الاجتماعية الفوضوية الناتجة.

وبناءً على ذلك، سيكون من الأفضل البدء بالاستخدام العملي لمعلومات الإنذار المبكر بالزلازل في التطبيقات التي لا تتسبب فيها الإنذارات الكاذبة والإنذارات الفائتة في حدوث عواقب كارثية.





إن إدخال أي مفاهيم ومنهجية جديدة تمامًا ينطوي حتمًا على بعض المخاطر. ومع ذلك، وبالنظر إلى التأثير الخطير جدًا الذي يحدثه زلزال كبير على المناطق الحضرية الحديثة، فمن المستحسن إدخال تدابير فعالة لتخفيف الأضرار على المدى القصير. وحاليًا بعد أن جرى إثبات الجدوى الفنية، فمن المهم البدء في استكشاف الاستخدام الفعال للإنذار المبكر بالزلازل.

• البحوث الأساسية في علم الزلازل والإنذار المبكر بالزلازل

إلى جانب أهميته العملية، يعد الإنذار المبكر بالزلازل موضوعًا مثيرًا للاهتمام في أبحاث الزلازل الأساسية. بعد وقوع الزلزال، تخضع عملية انتشار الموجة بشكل أساسي للبنية القشرية ومعادلة الموجة، ومن المتوقع أن يكون عدم اليقين صغيرًا إلى حدٍ ما.

وهذا على عكس التنبؤ التقليدي بالزلازل، حيث تخضع العملية لعوامل كثيرة مثل توزيع الإجهاد والقوة ومدى التفاعل بين الأجزاء المختلفة للقشرة وما إلى ذلك، ويكون التنبؤ حتمًا غير مؤكد إلى حدٍ كبير.

في الإنذار المبكر بالزلازل، إذا أمكن قياس مجال الإزاحة في المرحلة المبكرة بدقة، فيمكن تقدير تطوره المستقبلي بدقة إلى حدٍ ما باستخدام معادلات الموجات والبنية القشرية المعروفة (على الأقل تقريبًا).

للمضي قدمًا في هذه الطريقة بفعالية، نحتاج إلى إجراء بحث مكثف حول فيزياء الزلازل وانتشار الموجات في الوسائط غير المتجانسة ثلاثية الأبعاد. ومن





ثم، فإن مشكلة الإنذار المبكر بالزلازل ليست مشكلة عملية مهمة فحسب، بل هي أيضاً مشكلة علمية مثيرة للاهتمام.

قد يكون الإنذار المبكر بالزلازل إحدى المشكلات القليلة التي يمكن من خلالها تحقيق تنبؤات دقيقة نسبياً على المدى القصير. في معظم المشكلات الزلزالية، تكون التنبؤات الدقيقة على المدى القصير صعبة بسبب وجود العديد من العناصر غير المعروفة.





هل يمكن التحكم في قدر الزلزال خلال الثواني الأولى من التمزق؟

ما هي احتمالات أن يستمر التمزق الصغير في البداية في الانتشار ويتحول إلى زلزال كبير؟ يتم التحكم في انتشار أو إيقاف التمزق الزلزالي في النهاية من خلال توازن الطاقة بين عمل الانهيار الاحتكاكي وعمل الإجهاد المرن.

مع العبارة البسيطة المذكورة أعلاه، فإن المشكلة ليست تافهة: يمكن إثبات أنه في ظل ظروف أولية معينة، يعتمد التوازن بقوة على تاريخ التمزق وطريقته. على وجه الخصوص، يختلف تدفق الطاقة بشكل أساسي إذا انتشر الكسر على شكل صدع كبير أو نبضة كسر ذات قدر متغير.

يمكن تعريف قوة حاجز الزلازل من حيث معاملات الاحتكاك والإجهاد، ولكن قدرته على إيقاف التمزق ستعتمد بشكل حاسم على الخصائص الديناميكية وبشكل أساسي، على الطول المميز Λ (تقرأ لمدا) لنبضة الكسر (أو في حالة الكسر، نصف قطرها). ونتيجة لذلك، فإن احتمال استمرار الكسر الأولي في الانتشار يعتمد على قدر Λ لنبضة الكسر.

بالنسبة لسرعة انتشار التمزق المتوسطة v_r ، يمكن تعريف وقت الصعود على أنه $T_r \approx \Lambda/v_r$ ، ومن ثم فإن احتمال استمرار الانتشار يجب أن يعتمد على وقت الصعود. لقد قيل إن الفترة السائدة T_p يمكن استخلاصها من مخطط الزلازل؛ مع أن T_p مشتق من الثواني الأولية لمخطط الزلازل ومن ثم يعتمد فقط على المراحل الأولية للتمزق، إلا أنه يبدو أنه يتناسب مع القدر النهائي للزلزال.

تشير هذه النتائج المثيرة للاهتمام على الفور مسألة السببية: يجب العثور على مبرر مادي لهذا التحديد المسبق الواضح لقدر الزلزال. اقترح الباحثون أن يرتبط T_p بوقت الصعود T_r ، ونوضح كيف يمكن للمراحل الأولية للتمزق في T_r أن تؤثر على القدر النهائي للانفجار.





• عرض المشكلة

نطاق دراسات الإنذار المبكر هو توقع الاستجابة لحدث مدمر محتمل قدر الإمكان. يجب تحديد قدر الزلزال في أسرع وقت ممكن من أجل إثارة الاستجابة المناسبة، كما أن تقليل التأخير لبضع ثوان فقط قد يكون محددًا لنجاح القدر النهائي للزلزال (بالمعنى الاحتمالي)، حتى قبل انتهاء انتشار التمزق. لن نناقش هنا خصائص مرحلة النواة البطيئة وشبه الساكنة، ولكن المراحل المبكرة من تسارع التمزق الديناميكي وتقدمه.

يحدث زلزال على صدع في الزمن t_0 وفي الزمن t_1 ، يكون التمزق قد انتشر بالفعل إلى قدر محدود A ، ويشع نطاقًا موجيًا يجري التقاطه بواسطة واحد أو أكثر من أجهزة قياس الزلازل بالقرب من الصدع في الزمن t_3 . لكن هل تحمل خصائص التمزق في الزمن t_1 (والمجال الموجي المسجل في الزمن t_3) بعض المعلومات عن احتمال استمرار الكسر في الانتشار حتى يصل إلى القدر النهائي B ؟ إذا كانت الإجابة إيجابية، فما النموذج الفيزيائي للتمزق الذي يتفق مع هذه العبارة؟

• الكسر والحواجز ومفاهيم الطاقة

إن الاحتمال Π_p الذي يستمر تمزق الزلزال في الانتشار هو مكمل للاحتمال Π_s الذي يتوقف فيه التمزق، أي $\Pi_p = 1 - \Pi_s$ بمعنى آخر، علينا أن ندرس ديناميكيات التوقف للتمزق الزلزالي من أجل فهم الآلية التي يمكنها التحكم في





القدر النهائي للتمزق. يتوقف انتشار الزلزال عندما يصطدم التمزق بحاجز قوي بما فيه الكفاية، لذا فإن الخطوة الأولى هي قياس قوة الحاجز.

ينبغي تعريف قوة الحاجز النسبية من حيث توازن الطاقة، وقد عالجت العديد من الدراسات الكلاسيكية مسألة انتشار التمزق أو توقفه من حيث طاقة الكسر. أمكن تطوير هذا المفهوم في الأصل بواسطة الباحث **غريفيث (1921)**. عند وصف الظروف التي يصبح فيها الصدع الساكن غير مستقر ويبدأ في النمو. وقد جرى تطويره لاحقاً إلى مواقف أكثر تعقيداً، بما في ذلك العديد من حالات الانتشار الديناميكي.

في جميع الحالات، توصف المشكلة بشكل أساسي بأنها التوازن بين ظروف التحميل أو القوة الدافعة للكسر، من ناحية، والطاقة التي تتبدد بسبب عملية الكسر أو عن طريق إنشاء سطح متشقق حديثاً (طاقة الكسر)، والتي تميل، من ناحية أخرى، لمقاومة انتشار الصدع.

عندما يكون الحمل المطبق كافياً للتغلب على التبيد، ينتشر الشق، وإلا فإنه يتوقف. النقطة غير التافهة هي أن كيان القوة الدافعة للكسر المتاحة لا يعتمد فقط على الحمل المطبق عن بعد، ولكن أيضاً على هندسة المشكلة وقدرها، على وجه الخصوص، قدر الكسر الموجود مسبقاً.

لقد وصفت حواجز إيقاف الزلازل، على سبيل المثال، في الدراسات الرائدة التي أجراها **بوشون (1979)** و**آكي (1974)** لزلزال **باركفيلد عام 1966**. **ييني آكي** دراسته على العمل النظري السابق **لبارنبلات (1959)** و**إيدا (1973)** اللذين وصفا طاقة الكسر بأنها عملية تبيد تحدث في منطقة محدودة ومتماسكة حول الكسر المنتشر.





يتحكم القدر d للمنطقة المتماسكة في قياس الضغط عند طرف الكسر، ونتيجة لذلك، يتحكم عامل شدة الإجهاد K (بوحدة $\text{Pa m}^{1/2}$) وطاقة الكسر (عادة ما تسمى G ، بوحدة J m^{-2}). طول آخر، مسافة إضعاف الانزلاق المميزة G_c ، يسمح بقياس الطاقة المتبددة G ، مثل العمل المنجز عن طريق الاحتكاك ضد الانزلاق داخل منطقة التماسك.

سنذكر أولاً العلاقات الرئيسية التي تسمح بتحديد تدفق الطاقة أثناء انتشار نماذج الكسر البسيطة، ونجادل بأنه ينبغي التمييز بين تقديرين مستقلين لطاقة الكسر.

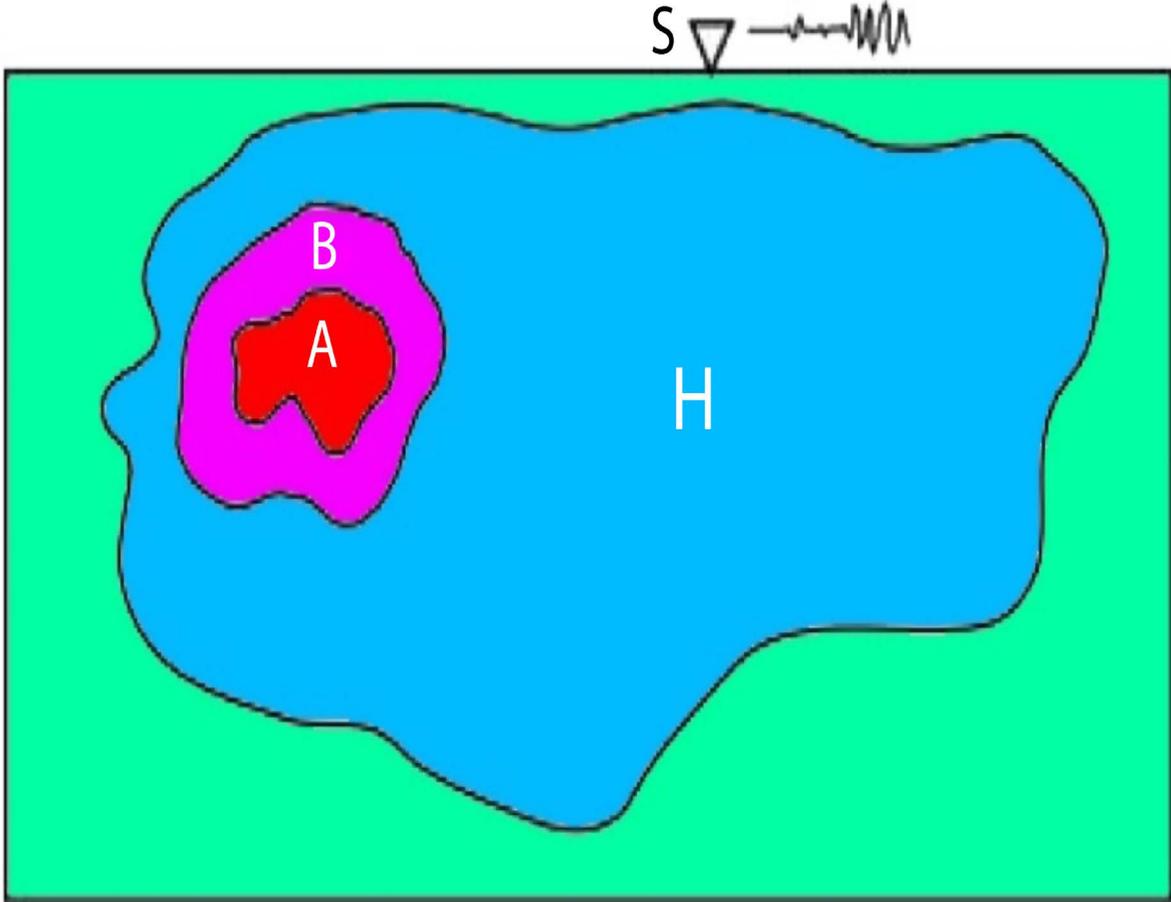
من ناحية يمكننا تعريف G_e على أنه تدفق الطاقة إلى طرف الكسر. تعادل G_e الكمية المحدودة من الطاقة المرنة المخزنة في المنطقة المجاورة لطرف الكسر، والتي يجري امتصاصها عندما يتقدم الكسر بطول وحدة.

مع أن G_e عادة ما يتعلق بمنطقة صغيرة حول طرف الكسر، إلا أنه يعتمد على الحمل الذي يوفره سجل الانزلاق السابق بكامله على وجوه الشق، ومن ثم لا يمكن تعريفه مسبقاً استناداً إلى خصائص الصدع المحلية.

من ناحية أخرى، يمكن تعريف الطاقة المتبددة G_w بأنها الشغل ضد الاحتكاك الزائد أثناء الجزء الأولي الضعيف من الانزلاق، اعتماداً، من حيث المبدأ، على معاملات الاحتكاك المحلية فقط.

من الواضح (كما في الشكل الآتي) أن عملية الكسر الديناميكي تلبى توازن الطاقة بحيث في الطاقة المتاحة، يجب أن يتزامن G_e والطاقة المتبددة G_w أثناء انتشار الكسر.





التمثيل التخطيطي لعملية الصدع الزلزالي وصياغة مشكلة السببية. افترض أنه في منطقة المصدر، امتد الكسر إلى المنطقة A في الوقت t_a ويستمر في التوسع. يصل الإشعاع الناتج عن A عند t_a إلى المستقبل S في الوقت t_b عند $t_b > t_a$. عند t_b وصل المصدر إلى منطقة أكبر A، ويستمر في الانتشار. ومع ذلك، فإن الإشارة التي تصل إلى S في الوقت t_b تحوي فقط على معلومات حول رقعة التمزق المبكر A؛ فهو لا يتأثر بـ A، ولا يتأثر بالمساحة الأكبر بكثير B، التي سيصل إشعاعها إلى S في أوقات لاحقة. والسؤال إذن هو: هل تؤثر خصائص المصدر في المنطقة الأولية «A» على فرص استمرار التمزق في النمو والوصول إلى القدر «B»؟ إذا كان الأمر كذلك، فهل يمكن تحديد هذه الخصائص في المجال المشع المبكر الذي يصل إلى S في الزمن t_b ؟



الموقع الأمثل في الوقت الحقيقي للإنذار المبكر من الزلازل

يمكن أن تستغرق الموجات **S** والموجات السطحية المدمرة الناجمة عن زلزال كبير عدة عشرات من الثواني للانتقال من منطقة مصدر الزلزال إلى المناطق المأهولة بالسكان البعيدة والبنية التحتية الحساسة.

إذا كانت هناك شبكة رصد زلزالي في منطقة المصدر، فإن طرائق التحليل الزلزالي وأنظمة الاتصالات الحديثة تسمح بتوصيف الحدث وإصدار رسائل الإنذار خلال ثوان، مما يترك عشرات الثواني لاتخاذ إجراءات التخفيف. ويُعرف هذا الإجراء بالإنذار المبكر. على سبيل المثال، بالنسبة لزلزال في منطقة إيريبينيا بجنوب إيطاليا، هناك تأخير يبلغ نحو **25-30 ثانية** قبل وصول أول قطارات الموجة **S** النشطة إلى نابولي على بعد نحو **80-100 كم**. ومن خلال نظام الإنذار المبكر، يمكن إرسال رسائل الإنذار إلى المواقع الحيوية في نابولي قبل **20 ثانية** أو أكثر من بدء الهزات القوية.

يتضمن توصيف الزلزال، والأهم من ذلك، تقديرات لموقعه وقدره. كان مهتمون بالحصول على أكبر قدر ممكن من القيود على موقع مركز الحدث مع مرور الوقت بعد اكتشاف الحدث.

يجري التعبير عن هذا القيد كدالة كثافة الاحتمالية (**pdf**) لموقع مركز الانفجار في الفضاء ثلاثي الأبعاد. ستشكل معلومات الموقع الأمثل والاحتمالية المتطورة بمرور الوقت جزءاً مهماً من رسائل الإنذار المبكر، مما يسمح باتخاذ الإجراءات بناءً على نطاق مسافات واتجاهات المصدر المحتملة كما جرى تقديرها في زمن كل رسالة.





هناك العديد من الطرائق لتحديد موقع الزلزال القياسي، والذي ينفذ عندما تكون جميع أوقات وصول المرحلة لحدث ما متاحة. تعتمد منهجيتنا المثالية لتحديد الموقع في الوقت الفعلي على صيغة فارق الزمن المتساوي (EDT) لموقع الزلزال القياسي.

(EDT) هو تعميم لطريقة المحطة الرئيسية وطريقة القطع الزائدة Method of Hyperbolas.

يجري تحديد موقع (EDT) من خلال الحد الأقصى للمكدس فوق الأسطح شبه الزائدية، حيث يكون الفرق في زمن السفر المحسوب لزوج من المحطات مساوياً للفرق في أوقات الوصول الملحوظة للمحطتين. يعد تحديد موقع (EDT) مستقلاً عن الزمن الأصلي ويختصر إلى بحث ثلاثي الأبعاد عبر خطوط الطول والعرض والعمق.

نظراً لأنه يستخدم المكدس Stack، فإن (EDT) قوي جداً في وجود القيم المتطرفة في البيانات. تعد هذه القوة أمراً بالغ الأهمية بالنسبة للمشكلة الحالية، نظراً لأننا غالباً ما نعمل مع أعداد صغيرة من البيانات وقد يكون لدينا بيانات أكثر غرابة مثل المشغلات الخاطئة والاختيارات التي تم تحديدها بشكل خاطئ بسبب المراحل النشطة اللاحقة.

يتضمن العمل السابق بشأن موقع الزلازل للإنذار المبكر عدة طرائق جديدة لتحديد الموقع في زمن سابق وبملاحظات أقل من موقع الزلازل القياسي.





جمع الباحث هوريوتشي وآخرون (2005) بين موقع الحدث المعياري $L2$ وموقع (EDT) على الأسطح شبه الزائدية والمعلومات من البيانات التي لم يتوصل إليها بعد لتقييد موقع الحدث الذي يبدأ عندما يجري تشغيل الوافدين من محطاتين.

يحدد الواصلان سطحًا زائديًا يمكن تحديد موقع الحدث عليه. القدر الأكبر الذي قد يحوي على مركز الانفجار يحده أسطح (EDT) التي جرى إنشاؤها باستخدام الوقت الحالي (t_{now}) كبديل لأوقات الوصول المستقبلية غير المعروفة إلى المحطات التي لم تسجل الوصول بعد. يتقلص هذا القدر مع تقدم T_{now} ، حتى لو لم تسجل أي محطات أخرى وصولاً.

• الطريقة

يفترض الباحثون في هذه الطريقة أن الشبكة السيزمية لديها مجموعات معروفة من المحطات العاملة وغير العاملة، وأنه عند حدوث زلزال، ستصبح اختيارات وصول الموجة P متاحة من بعض المحطات العاملة، وأنه قد يكون هناك اختيارات خارجية لا ترجع إلى وصول P .

وترتبط منهجيتهم بمنهجية هوريوتشي وفريقه (2005)، والتي تقوم على توسيعها وتعميمها من خلال:

أ. بدء إجراء الموقع بعد تشغيل محطة واحدة فقط.





ب. استخدام نهج (EDT) طوال الوقت لدمج الوافدين المحفزين والمحطات التي لم يجر تشغيلها بعد.

ج. تقدير مركز الهبوط احتمالياً باعتباره (pdf) بدلاً من نقطة.

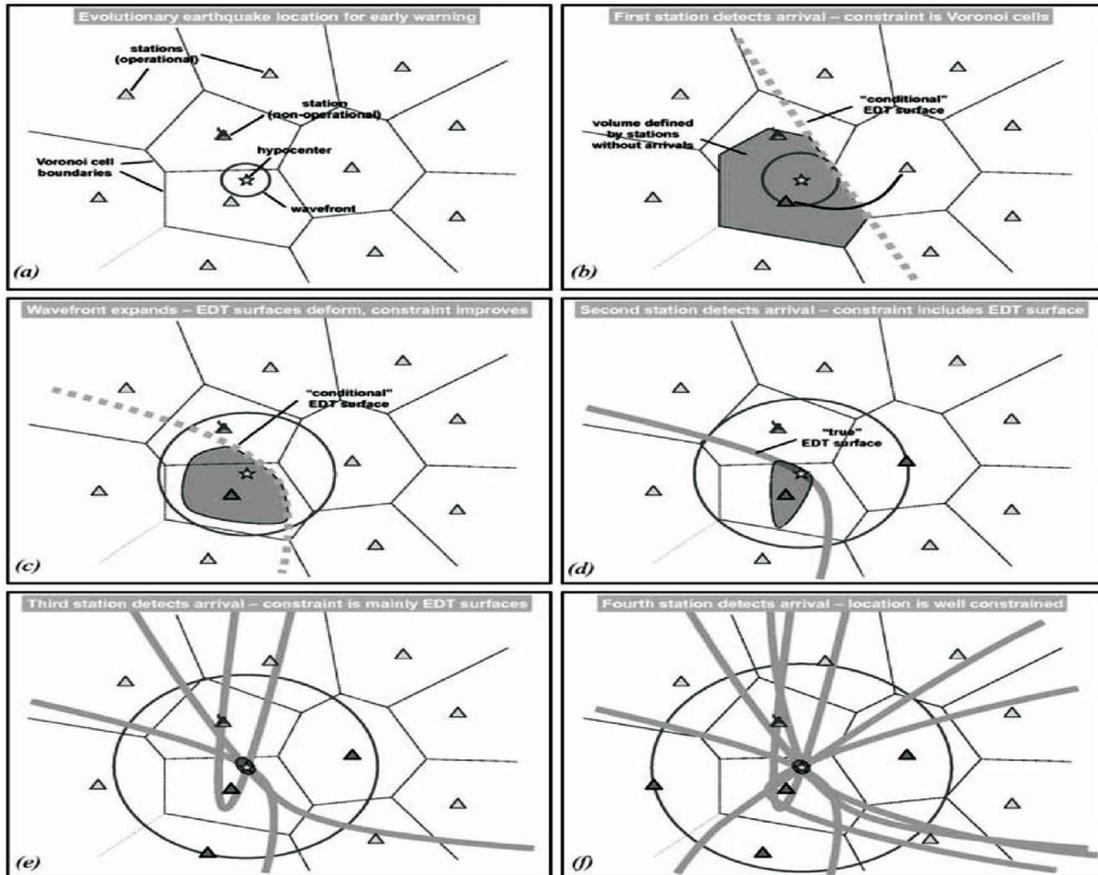
د. تطبيق بحث عالمي كامل لكل تحديث لتقدير الموقع.

عندما يجري تشغيل المحطة الأولى Sn عند الوصول إلى $t_n = t_{now}$ ، يمكننا بالفعل وضع حدود مفيدة على مقدار (pdf) الذي من المحتمل أن يحوي على مركز الانحدار.

يجري إعطاء هذه الحدود من خلال أسطح (EDT) المشروطة التي يكون فيها وقت السفر P إلى محطة التشغيل الأولى $tt_n(x)$ مساوياً لزمّن السفر إلى كل محطة من المحطات العاملة ولكن لم يجر تشغيلها بعد، $tt_l(x), l \neq n$.

في حالة الوسط المتجانس، يكون قدر (pdf) تحت المركز هو خلية فورونوي Voronoi Cell حول محطة التسجيل الأولى المحددة بواسطة الأسطح المنصفة المتعامدة مع كل محطة من المحطات المجاورة المباشرة (الشكل الآتي).





خوارزمية موقع الزلازل التطورية (أ) بالنظر إلى شبكة زلزالية بها مجموعات معروفة من المحطات العاملة وغير العاملة، يمكننا مسبقاً تحديد خلية فورونوي المرتبطة بكل محطة. (ب) عندما يجري تشغيل المحطة الأولى، يمكننا تحديد القدر الذي من المحتمل أن يحوي على مركز تحت الأرض محدود بأسطح (EDT) «المشروطة» التي يكون وقت سفر P إلى محطة التشغيل الأولى مساوياً لوقت السفر إلى كل من محطات التشغيل ولكن لم يجر تشغيلها بعد. (ج) مع مرور الوقت، نحصل على معلومات إضافية من المحطات التي لم تشغل بعد: تتحرك أسطح (EDT) نحو محطة التشغيل الأولى وتحنى حولها، وينكمش قدر المركز السفلي. (د) عندما تشغل المحطة الثانية، يمكننا تحديد سطح (EDT) «حقيقي» ومن المرجح أن يكون مركز التمزق الفعلي عند التقاطع بين هذا السطح والقدر المحدد السابق (الذي يستمر في الانكماش). (هـ) عندما تشغل محطة ثالثة، يمكننا تحديد سطحين إضافيين «حقيقيين» لـ (EDT)، مما يزيد من القيد على موضع المركز السفلي. (و) مع تشغيل المزيد من المحطات، يتقارب الموقع مع الموقع القياسي بتوقيت شرق الولايات المتحدة.



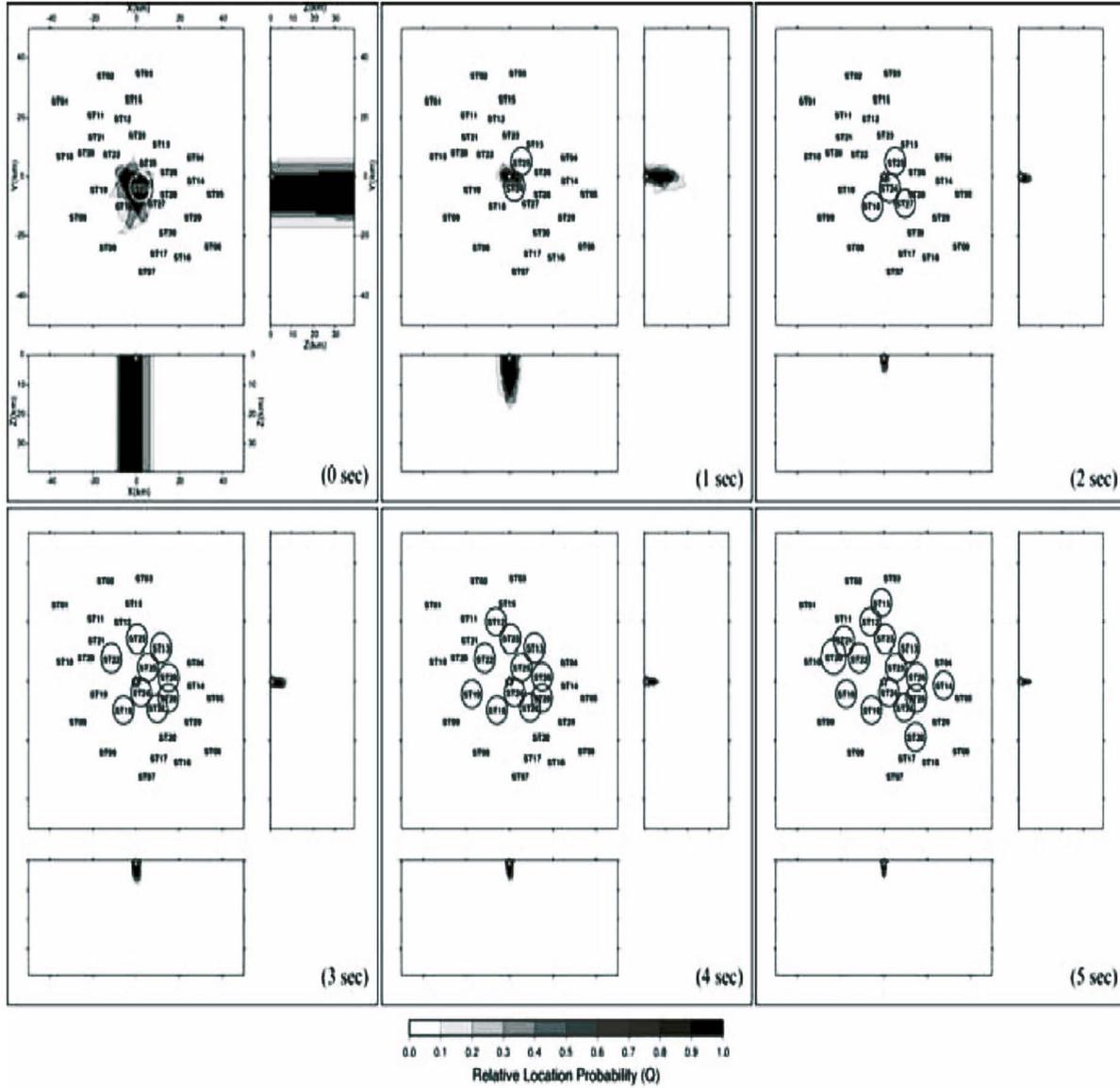
إذا كان هناك عدد قليل من البيانات المتطرفة، فإن قدر (pdf) النهائي للمركز التحتي سيعطي عادة تقديراً غير متحيز للموقع تحت المركز، كما هو الحال مع موقع (EDT) القياسي. ومع ذلك، إذا كان واحد أو أكثر من أوقات الوصول الأولى غير عادي، فقد تكون التقديرات المبكرة لـ قدر (pdf) تحت المركز متحيزة. إذا كان N_{out} هو عدد البيانات المتطرفة، فيجب تقليل الانحياز بشكل كبير بعد الحصول على نحو $4+N_{out}$ الوافدين، ويجب تقليله بشكل أكبر مع تقارب الحل نحو موقع (EDT) القياسي.

• اختبارات الموقع

من أجل تقييم دقة ومثانة تقنية تحديد الموقع، أجرى الباحثون العديد من الاختبارات الاصطناعية باستخدام هندسة ISNet (شبكة إيريبينيا Irpinia الزلزالية، جنوب إيطاليا) ونموذج 1D Vp للمنطقة مع Vp/Vs ثابت يبلغ 1.68. يأخذ اختبارنا الأول في الاعتبار حدوث زلزال ضحل في مركز الشبكة على عمق كيلومتر واحد. يقع الحدث باستخدام مشغلات P فقط.

تمثل كل لوحة في الشكل الآتي الإسقاط على طول ثلاث طائرات متعامدة تمر عبر المركز الحقيقي لكثافة احتمال موقع الزلزال $Q(i,j,k)$. يجري التقاط اللقطة الأولى عندما تشغل المحطة الأولى (ST24 $T=0$)؛ يتحدد القيد على موقع الزلزال من خلال القدر المحدد في المعادلة (1)، ولا يوجد أي قيد على العمق. بعد ثانية واحدة، تشغل المحطة ST25؛ أصبح الموقع حالياً مقيداً بالقدر المحدد مسبقاً (والذي كان ينهار حول المحطة ST24) وسطح (EDT) المحدد بالمعادلة (3). بعد ثانيتين، أمكن تشغيل 4 محطات وأصبح الموقع مقيداً بشكل جيد بالفعل لأغراض الإنذار المبكر.





اختبار الموقع لحدث يقع في مركز شبكة ISNet. يتم عرض دالة الاحتمال على طول ثلاث طائرات تمر عبر مركز الانفجار الحقيقي (المحدد بنجمة). $T=0$ sec هو الوقت الذي يتم فيه تشغيل المحطة الأولى. لكل نقطة، يتم وضع علامة على المحطات التي تم تشغيلها بدائرة. يتم تنفيذ الموقع باستخدام اختيارات P فقط.





يوضح الشكل الآتي موقعاً نُقِّدَ باستخدام مشغلات **P** فقط لزلزال يحدث خارج الشبكة على عمق **10 كم**. عند $T = 0$ ، يقتصر الحد الأقصى لقدّر الاحتمال على الشبكة فقط. بعد ثانية واحدة، يتم تشغيل محطتين أخريين ويتم تحديد مستوى الصوت في كل الاتجاهات. مع تطور الوقت، يتحسن القيد على قدر الموقع، لكنه يحتفظ بشكل ممدد، لأنه بالنسبة للأحداث خارج الشبكة، يجري تحديد مسافة الحدث بشكل سيء. العمق مقيد فقط بحد أدنى، ولكن حدود العمق هذه تتضمن القيمة الحقيقية.

في الآونة الأخيرة، حدثت في إيطاليا زلازل كبيرة تتميز بتصدعات الأحداث المتعددة والنشاط الزلزالي المكثف المرتبط بالهزات النذيرة والهزات الارتدادية، وتحديدًا في فيريولي في عام **1976**، وإيربينا في عام **1980**، وأومبريا-ماركي في عام **1997**.

الحدث الرئيسي في منطقة إيربينا، زلزال **1980**، $M_w = 6.9$ ، كان له أحداث فرعية متعددة مع ثلاث صدمات رئيسية تحدث في غضون 20 ثانية تقريبًا من بعضها بعضًا. لذلك، من المهم التحقق من كيفية أداء طريقة الموقع التطوري لدينا عند وقوع حدثين أو أكثر في وقت قريب.

لقد أجرى الباحثون اختبارًا تركيبياً لحدثين يقعان في أماكن مختلفة داخل شبكة **Irpinia** الزلزالية مع فصل أوقات الأصل بمقدار **3 ثوانٍ**، باستخدام اختيارات **P** و **S** للموقع (الشكل الآتي **a**).

إذا جاء اختيار **S** من الحدث الأول (**S1**) بعد اختيار **P** من الحدث الثاني (**P2**)، فإننا نفترض احتمالاً بنسبة **20%** لنظام التشغيل لتفسير **P2** على أنه **S1** بشكل خاطئ.





على سبيل المثال، **ST13** هي المحطة الأولى التي تسجل الحدث الثاني، ولكنها لا تعمل بشكل صحيح. يأتي المشغل الأول من المحطة **ST25**، مما يؤدي إلى انحياز تقدير المركز تحت الأرض في بداية عملية تحديد الموقع (الشكلان **(b, c)**).

ومع ذلك، يقل الانحياز بشدة بعد نحو ثانية واحدة، بمجرد تشغيل المحطات الجديدة باستمرار. هناك اختيارات أخرى جرى تفسيرها بشكل خاطئ عند **T = 4.6s (ST13، S1 ك S2)**، **8.7s (ST14، S1 ك P2)**، **8.8s (ST04، S1 ك S2)**، و **12.5s (ST02، S1 ك P2)**. ومع ذلك، لا تؤثر هذه القيم المتطرفة بشكل كبير على جودة الموقع، نظراً لأن ذلك مقيد بالفعل بعدد كبير من الاختيارات المتسقة (الشكل **(c)**). يمكن تقدير الوضع تحت المركزي بشكل صحيح، مع عدم وجود تذبذبات قوية بعد نحو ثانيتين من الزناد الأول، في حين يتحدد العمق بشكل صحيح بعد **4-5 ثوانٍ**. في كلا الحدثين، يصبح عدم اليقين في مكونات **X** و **Y** أصغر من **1 كم** بعد نحو **4 ثوانٍ** من الزناد الأول، في حين أن عدم اليقين في **Z** أقل من **2 كم** بعد **5 ثوانٍ**.





التقييم الكمي للمخاطر الزلزالية

نظراً لأن انهيار المباني الناجم عن حركة اهتزازات الأرض أثناء الزلازل المدمرة هو السبب الرئيسي للضحايا، فإن التقدير المسبق الصحيح لحركة الأرض هذه يعد عنصراً ضرورياً، ولكنه في الواقع ليس كافياً، من أجل صياغة سياسة فعالة لتخفيف المخاطر. تنتقل استراتيجيات التقدير الأرضي الزلزالي الكمي من الاستراتيجيات الحتمية البحتة إلى الاستراتيجيات الأكثر إحصائية.

لقد تناول الباحثون بشكل مبدئي قضايا الأرصاد المطلوبة من أجل تقييد وصف البنية القشرية حيث تنتشر الموجات ومن أجل بناء آليات مناسبة للمصدر المحدود والممتد. يجب علينا وصف أساليب تكميلية مختلفة لتقدير أفضل للحركة الأرضية. يمكن استخدام القياسات الجيوفيزيائية والجيوتقنية لإعادة بناء النموذج.

سيوفر كل من مخططات الزلازل المسجلة للزلازل الكبيرة والاستقراء المحتمل لمخططات الزلازل المسجلة من الأحداث الصغيرة بيانات يمكن أن تصفها أداة انتشار الموجات في خطوة أولى وقد تستوعبها في خطوة ثانية أكثر طموحاً.

بالنسبة لمحتويات تردد محددة - لا تزال تقتصر حالياً على الترددات المنخفضة، أي بشكل عام أقل من **1 هرتز** - قد توفر الطرائق الرقمية تقديراً لحركة الأرض باستخدام أساليب حتمية بحتة.

سوف نقوم بدراسة إمكانات الطرائق المختلفة التي يبدو أنها تؤدي إلى مخططات زلزالية واقعية تماماً بمجرد تحديد المصدر والوسيط بدقة معينة، وذلك بفضل الزيادة المذهلة في كفاءة الحاسوب.





لا تزال هناك ثلاثة أسئلة رئيسية مفتوحة، وسيتم تناولها بشكل مبدئي هنا، مع توضيحها ببعض الأمثلة:

- ❖ ما هو الحد الأعلى للتردد لهذا النهج، علماً أنه يعتمد على قدرتنا على الوصف الدقيق لوسط الانتشار والمصدر الزلزالي؟
- ❖ كيف ينبغي التحقق من صحة تقديرات الحركة الأرضية هذه وما هي الثقة التي يجب أن نربطها بها؟
- ❖ كيف ينبغي الجمع بين هذه الأساليب الحتمية مع المزيد من الأساليب العشوائية التي تبدو ضرورية عند الترددات الأعلى حيث لا يكون من الممكن إعادة بناء النماذج الدقيقة؟

• إعادة بناء السرعة القشرية والسطحية باستخدام أنظمة الحصول على البيانات السلبية والنشطة

في الأساس، يوجد مقياسان أساسيان لتوصيف الوسط لتقدير اهتزاز الأرض: النطاق المحلي والمقياس الإقليمي، على التوالي، من بضع عشرات من الأمتار إلى بضع كيلومترات.

يعتمد اتساع الموجات من المصدر إلى سطح الأرض على كيفية انتقال الموجات في البنية الجيولوجية على المستوى الإقليمي. قد يؤدي تباين السرعة المتغيرة مع العمق إلى اختلاف كبير في مسار الموجة وسعتها. على سبيل المثال، قد يؤدي توجيه الموجات على الحدود القارية/الهامشية إلى تغيير الموجات الواردة التي تؤثر على مدينة قريبة من الخط الساحلي.





ستعمل تقنيات وظيفة الاستقبال على زيادة معرفتنا بالهياكل الإقليمية. طرائق جديدة تعتمد على الارتباط المتبادل لإشارات الضوضاء على النحو الذي اقترحه الباحث شايبورو وآخرون (2005) سيسمح بإعادة البناء على هذا النطاق الإقليمي دون الحاجة إلى مصادر زلزالية محلية. وبطبيعة الحال، فإن إثارة الموجات الزلزالية ستأتي من مصادر عامة مثل العواصف المحيطية.

يساهم الانتشار المحلي السطحي وتأثيرات الموقع في تعقيد مخططات الزلازل وتتطلب وصفاً دقيقاً لعشرات إلى بضع مئات من الأمتار تحت السطح. إن أكبر التباينات الميكانيكية التي لوحظت في الطبقة المتعرضة للتجويف ومنطقة الغطاء الرسوبية تغير بقوة انتشار الموجات المرنة (التركيز، والحيود وما إلى ذلك)، وتعديل محتويات السعة النسبية لنطاقات ترددية مختلفة فيما يتعلق بما يتوقعه المرء من الانتشار الهندسي البسيط مع تبديد بسيط للآليات.

تؤثر هذه التعديلات وغالباً ما تزيد من سعة الحركة الأرضية لنطاق تردد محدد قبل اهتزاز المباني. علاوة على ذلك، بما أن التربة السطحية قد تتصرف بشكل غير خطي في ظل سلالات كبيرة (بضعة أعشار من النسب المئوية إلى بضعة نسب مئوية)، فإن التوصيف الدقيق لهذه الطبقة يتطلب العديد من المعالم للنمذجة الملائمة لسلوكها الريولوجي **Rheological Behaviour** المعقد، وخاصة الجزء السطحي جداً (العلوي 20-30 متراً).

عادةً ما يكون جمع المعلومات من الآبار غير كافٍ بسبب محدودية أخذ العينات والشكوك المرتبطة باستيفاء البيانات المكانية. علاوة على ذلك، فإن التحقيقات الجيوفيزيائية/الجيوفيزيائية القياسية مثل الحفرة المتقاطعة أو الحفرة السفلية قد تؤدي إلى تحيز بسبب مسارات الموجات المميزة.





وكبديل، يمكن للمرء أن يفكر في استخلاص الخصائص الكمية في الأعماق الضحلة من التجارب الزلزالية النشطة عندما تكون متاحة وكذلك التجارب الزلزالية السلبية. يسمح التحليل الزلزالي للموجات السطحية بإعادة بناء الملامح الرأسية. مهما كانت تقنية إعادة البناء، فهذا يتطلب بالتأكيد أدوات كثيفة جداً.

على وجه الخصوص، هناك تطورات واعدة جارية لاسترداد ملف تعريف سرعة موجة القص من التحليل الدقيق لحقل موجة الهزة الدقيقة، من خلال تقنيات مختلفة، إما بسيطة جداً - ولكنها صعبة ومضللة في بعض الأحيان - مثل تقنية H/V أو أكثر تقدماً مثل مصفوفة التقنيات.

تتيح الملامح الزلزالية عالية الدقة بالمثل في البحر وصفاً دقيقاً للوحدات الجيولوجية المختلفة، مما يسمح بإعادة البناء ثلاثي الأبعاد للسطح الضحل الذي يبلغ نحو بضع مئات من الأمتار.

مع زيادة كثافة أجهزة الاستشعار، يمكن للمرء استخلاص المزيد من المعلومات من مخططات الزلازل بناءً على التماسك الجانبي وتكرار المراحل المحولة. قد تكون الاختلافات المحلية الحادة في مقاومة السرعة مفيدة لتقييم إعادة بناء النموذج. ستعمل كل من تقنيات الترحيل للمصادر النشطة في الهياكل المعقدة وتحليل المرحلة المحولة على تحسين دقة إعادة الإعمار لدينا كما هو الحال في توصيف الخزان ومراقبته.

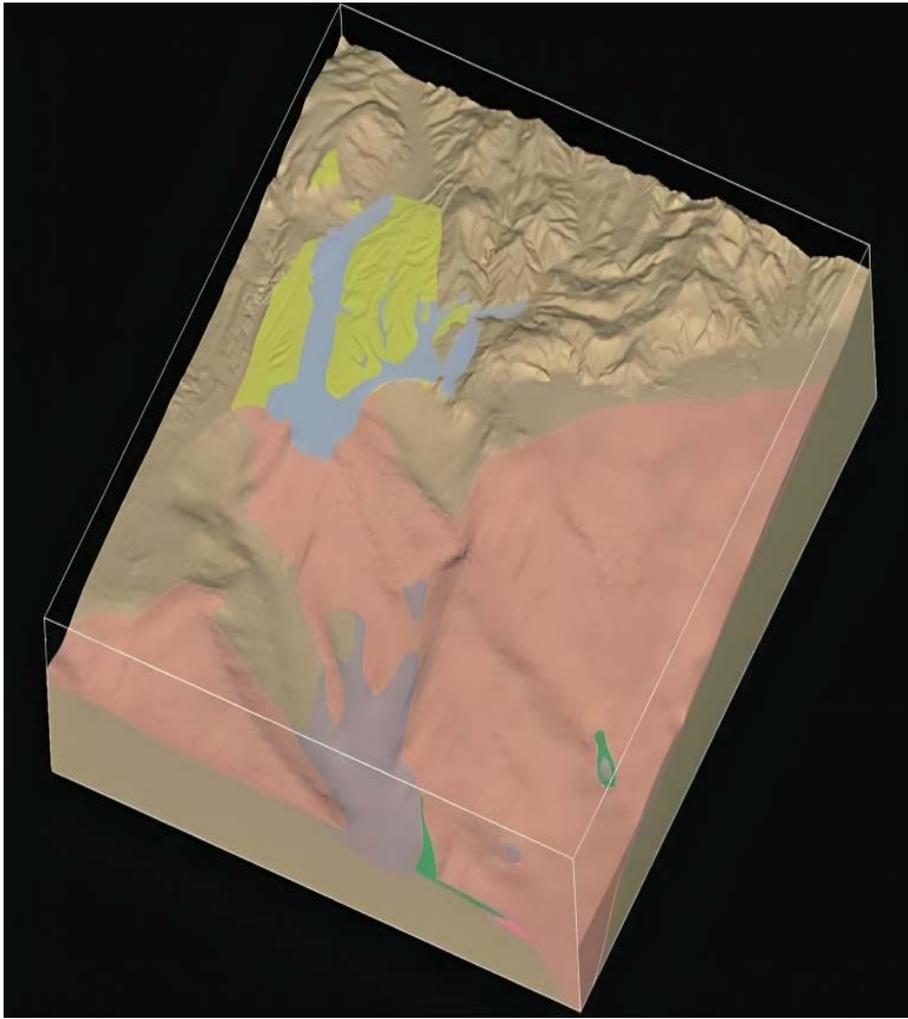
بأي طريقة نستخرج المعلومات لوصف نموذج حتمي ثلاثي الأبعاد، يجب إدراج هذه المعلومات باستخدام استراتيجية تحديث ديناميكية تعتمد على الجمع بين أجزاء مختلفة من المعلومات من أصول مختلفة ذات صفات وقرارات وشكوك مختلفة.

يجب أن تكون مولدات النماذج هذه قادرة على دمج أجزاء مختلفة من المعلومات من الجيولوجية إلى الجيوفيزيائية ويجب أن تنتج ما هو مطلوب





لنمذجة انتشار الموجات بشكل مناسب: على سبيل المثال، يجري توفير وصف للوسط غير المتجانس من أجل منطقة مدينة نيس (كما في الشكل الآتي). مع زيادة المعرفة في المنطقة المدروسة، يمكن للمرء ترقية المعلومات داخل المولد وتوفير إعادة بناء نموذج جديد لنمذجة أفضل.



وصف النموذج باستخدام أحد مصممي النماذج الجيولوجية لمنطقة نيس في فرنسا.





• وصف المصدر لمنطقة زلزالية تكتونية معينة

ومهما كان وصف الوسيط، فإننا بحاجة إلى تقدير كمي للمصادر المتوقعة لمحاكاة دقيقة للإثارة المتوسطة وانتشار الموجات. وينبغي توفير كل من هندسة المنطقة المنزلة وكذلك توزيع الانزلاق. وقد تؤدي القيود الرقمية النموذجية إلى مواصفات أخرى مثل كثافة الشبكات أو القدر المحدود للصندوق للمحاكاة مع إمكانية تقليلها مع إنشاء نماذج محسنة.

ويجب إعداد الوصف الزلزالي التكتوني بطريقة تؤدي إلى تقدير المصادر المحتملة. يعد تحديد الصدع النشط عنصراً أساسياً في تعريف المصدر هذا، ومن المؤكد أن الجسور من الزلازل القديمة إلى الزلازل التاريخية ستكون ذات أهمية حاسمة بالإضافة إلى الإطار التكتوني للمنطقة المستهدفة.

يجب توفير حالات عدم اليقين في هندسة مصدر الصدع وكذلك توزيع الانزلاق حيث إن عمليات المحاكاة قد تتغلب جزئياً على مشكلة المعرفة هذه عن طريق تنفيذ سيناريوهات مختلفة.

يمكن للمرء أن يقدر تقلب الحركة الأرضية على حساب جهد حاسوبي مكثف. وبطبيعة الحال، فإن تضيق هذا التباين من خلال تقييد سيناريو المصدر الزلزالي المحتمل في منطقة معينة بشكل أفضل له أهمية حاسمة بسبب التأثير الاقتصادي لمثل هذا التقدير على إدارة الأراضي.

إن الوضع الحالي لنمذجة المصدر المباشر هو أنه في حين تُحسب مخططات الزلازل منخفضة التردد باستخدام نماذج المصدر الحركية أو الديناميكية، يمكن نمذجة الترددات العالية باستخدام مذبذبات عشوائية. تتمثل إحدى الصعوبات الرئيسية في عمليات المحاكاة هذه في التنبؤ بالاتجاه الصحيح للإشعاع عند جميع الترددات.





وينبغي تحديد الحد الأقصى لتردد العتبة بين مسألتي النمذجة هاتين، ولكنه سيتراوح بالتأكيد حول بضعة هرتز. ولذلك، ينبغي للاستراتيجية المتكاملة أن تجد طريقة لدمج هذه النتائج في إطار مشترك. من المؤكد أن هذا التحليل سيضع قيوداً على وصف المصدر الزلزالي: قد تكون الميزات الصغيرة غير ضرورية لمحاكاة انتشار الموجات، ومن ثم يمكن تجنبها.

يرتبط حد التردد هذا بعدم كفاية المعرفة ببنية القشرة الأرضية وحركية المصدر عند الطول الموجي القصير ومن ثم عند الترددات العالية، مما يقودنا إلى قيمة تبلغ نحو بضعة هرتز.

قد تكون الاستراتيجيات البديلة هي استقراء الأحداث الصغيرة من أجل تقدير الزلازل الافتراضية الكبيرة. عند تسجيلها، يمكن استخدام مخططات الزلازل المرتبطة بها كوظائف خضراء تجريبية حيث يكون إعادة بناء النموذج مستحيلاً طالما جرى وصف المصادر الزلزالية بشكل صحيح.

ولهذا الغرض، يجب إجراء وصف دقيق مبدئي للزلازل الصغيرة مع تحديد موقع أفضل وآلية بؤرية دقيقة. يعد تقدير القدر أمراً ضرورياً ويجب تقديره بدقة لتحويل العزم الزلزالي. ستساعد دراسات الزلازل الصغيرة عند تسجيلها في الحصول على خصائص زلزالية أكثر دقة للمنطقة النشطة الزلزالية التي جرى التحقيق فيها.

ويمكن إعادة بناء خصائص مصدرها من خلال عدد قليل من مخططات الزلازل غير المشبعة، مما يوفر رؤى أساسية حول تعريف الحدث الرئيسي المتوقع.





علاوة على ذلك، قد تساعد مخططات الزلازل هذه أيضاً في التحقق المناسب من تقديرات الحركة الأرضية مع تحسين أدوات النمذجة.

وبطبيعة الحال، فإن الاختلافات في الخصائص الميكانيكية والسلوكيات بين الزلازل الصغيرة والكبيرة ستبقى مسألة مفتوحة يمكن معالجتها حيث يجري تسجيل الزلازل الكبرى.

ماذا ستكون الاستراتيجية الممكنة في المستقبل: هل يجب أن نعتمد على نموذج المصدر الحركي الدقيق حيث يعاد بناء توزيعات الانزلاق بشكل مناسب في الوقت المناسب على مستوى الصدع أم يجب أن نفكر في النماذج الديناميكية حيث ستؤخذ قوانين الاحتكاك في الاعتبار بالإضافة إلى توزيع التماسك.

تستخدم كلا الطريقتين في الأدبيات الخاصة بنمذجة وتصوير المصدر الزلزالي مع أن النهج الديناميكي لا يزال يتطلب الحاسوب لاستعادة وظائف الاحتكاك والفشل على سطح الصدع.

• انتشار الموجات الزلزالية في الوسائط غير المتجانسة ثلاثية الأبعاد

ستزداد المعرفة بالهياكل القشرية في المستقبل لأن البيانات الجديدة ستزودنا بمعلومات تراكمية، يمكن جمعها بشكل رئيسي على سطح الأرض. بالنسبة لسيناريوهات الزلازل المحددة المختلفة، يمكن للمرء المضي قدماً في محاكاة دقيقة وحتمية للحركة الأرضية باستخدام تقنيات مختلفة.

حتى الوقت الحالي، لم تظهر تقنية محددة مناسبة تماماً لنمذجة الحركة الأرضية الزلزالية، بينما ركزت محاكاة المناخ على الأساليب الطيفية الزائفة.





لقد ثبت أن هذه التقنيات موثوقة إلى حدٍ ما، وفعالة وواسعة النطاق للتكامل التفاضلي الجزئي على حجمٍ كروي.

ولذلك، بالنسبة لانتشار الموجات الزلزالية على نطاق إقليمي، ما زلنا ندرس الأساليب وأدائها، وخاصة من أجل التنفيذ الدقيق للمصادر الموسعة: على سبيل المثال، حقق الباحث داي وآخرون (2005) في الأداء الخاص بالتقنيات المحدودة المختلفة وطرائق العناصر الحدودية.

وبما أن الموجة تؤثر على منطقة الموقع، يجب على المرء في كثير من الأحيان النظر في آليات مختلفة للتوهين بالإضافة إلى السلوك غير الخطي المحتمل للتربة والذي قد يعدل بشكل كبير استجابة الحركة الأرضية.

التضاريس والهياكل تحت السطح غير المتجانسة تزيد من تعقيد مخططات الزلازل. ومن المؤكد أن النمذجة يجب أن تأخذ هذه النقاط بعين الاعتبار.

إذا قامت اللاخطية بدور مهم، فيجب علينا استخدام مخططات الزلازل للزلازل الصغيرة بحذر من أجل التقييم التجريبي لحركة الأرض للزلازل الأكبر. وينبغي بناء منهجيات استقراء دقيقة واختبارها على البيانات المتاحة بالفعل، مع عدم وجود مساحة كافية للتعليق أكثر في هذا الاتجاه.

استخدمت ثلاث تقنيات قياسية من قبل مجموعات مختلفة لمحاكاة انتشار الموجات الزلزالية. تعد طرائق التكامل الحدودي جذابة جداً لأنها تقلل من بُعد التمييز بمقدار واحد. يعتمد الاختلاف المحدود وتقنيات القدر المحدود الأكثر تنوعاً على مبادئ بسيطة جداً تجعل هذه التقنيات فعالة جداً. وأخيراً، تتعامل مناهج العناصر المحدودة مع الأشكال الهندسية المعقدة وتسمح بطريقة العناصر الطيفية المحددة بإجراء عمليات محاكاة دقيقة.





التقنيات الناشئة القائمة على الوصف الدقيق للتفاعلات البسيطة بين العناصر المنفصلة قد تحاكي ميزات انتشار الموجات، وقد تسمح بالامتداد إلى الوسائط المسامية الأكثر تعقيداً والسلوكيات غير الخطية.

وأخيراً، قد يوصى باستراتيجية محتملة تعتمد على الاقتران بين التقنيات العددية المختلفة للاستفادة من مزايا كل من هذه التقنيات وتجنب عيوبها. على سبيل المثال، قام الباحث **أوتشي وفريقه (2003، 2004)** بوضع نموذج للمصدر الزلزالي غير المستوي من خلال عناصر حدودية مدمجة في بنية ثلاثية الأبعاد يجري تمييزها بواسطة طريقة الفرق المحدود.

جرى تصميم الرواسب الضحلة غير الخطية باستخدام تقنية العناصر المحدودة حيث تتوفر المعاوقة على حدودها من خلال حساب فرق محدود واسع النطاق.

• معادلات التكامل الحدودي

تتطلب طرائق التكامل الحدودي تمييز الأسطح التي تحدد المناطق التي تكون فيها خصائص الوسط بحيث يمكن حساب وظائف اللون الأخضر تحليلياً. إن كيفية تمييز هذه الأسطح تقدم اختلافات بين التركيبات المختلفة. التفاعلات بين نقاط هذه الأسطح تؤدي إلى التفرد عندما تنهار النقاط في المكان نفسه. يجب تقدير هذه التفردات بعناية لوضع نماذج دقيقة.





• الفرق المحدود - طرائق القدر المحدود

تحظى تقنيات الفرق المحدود بشعبية كبيرة بسبب بساطة التصميم المتعلقة بالكفاءة العددية وهو أمر بالغ الأهمية للنظر في الأشكال الهندسية ثلاثية الأبعاد. تعد كيفية فصل الوسط قضية رئيسية، خاصة عند النظر في الكثافة والمعالج المرنة: اقترح الباحث **غريفيز (1996)** متوسطاً توافقياً محلياً لنمذجة حيود أفضل بينما قدم الباحث **بيتاركا (1999)** من بين آخرين شبكات غير منتظمة مكانياً. قام **الباحث موكزو وآخرون (2004)** بتحليل الدقة العددية بعناية للسطح الحر في تكوين ثلاثي الأبعاد. أمكن إجراء عمليات محاكاة مكثفة بواسطة الباحث **أولسن (2001)**.

لقد جرى تحسين تنفيذ شروط الحدود الممتصة بشكل كبير في السنوات القليلة الماضية: على سبيل المثال، اقترح الباحث **مارسينكوفيتش وأولسن (2003)** تنفيذاً عملياً لطريقة الطبقة المطابقة تماماً (PML) للتكوين الزلزالي ثلاثي الأبعاد.

لقد وجد أن طرائق القدر المحدود أكثر صعوبة في التنفيذ، لكن التحقيقات الأخيرة التي أجراها كاسر و**إيجل (2001)** أثارت الاهتمام مرة أخرى بسبب مرونة مثل هذا النهج الذي كان ناجحاً جداً في الكهرومغناطيسية.

• طرائق العناصر المحدودة (نهج العناصر الطيفية)

لقد أمكن تطبيق أساليب العناصر المحدودة منذ فترة طويلة في نمذجة انتشار الموجات الزلزالية. تتوفر حالياً طرائق العناصر المحدودة المتوازية لانتشار الموجات الزلزالية على المستوى الإقليمي.





أظهرت تقنيات الاستيفاء الجديدة ذات الترتيب العالي المستندة إلى نقاط غاوص- لوباتو-ليجندر **Gauss-Lobatto-Legendre** تقاربًا طيفيًا للحلول مع الاحتفاظ بالاستيفاء المحلي. تُظهر الامتدادات المختلفة على المستوى العالمي مدى قوة هذه الصيغة المتغيرة. على سبيل المثال، تم تناول التأثيرات المعقدة مثل تأثيرات الجاذبية من قبل الباحث شاجلوبوب وفاليت (2004). جرى تنفيذ شروط حدود **PML** أيضًا لتحديد وسيلة لا نهائية.

• طرائق العناصر المنفصلة (العنصر المميز/نهج الشبكة)

نظرًا لأن النهج الشبكي يأتي من محاكاة تدفق السوائل، فهو مناسب عند النظر في الوسائط المعقدة. أمكن إجراء محاولات قليلة عند النظر في انتشار الموجات الزلزالية حيث يجب على المرء أن يأخذ في الاعتبار سرعتين للانتشار.

اقترح الباحثان **هوانغ ومورا (1994)** صياغة صوتية ذات سلوك غير خطي معقد محتمل. وفي الآونة الأخيرة، تمكن الباحثان **تومي وبين (2000)** من إعادة إنتاج ميزات الانتشار المرنة من خلال النظر في التفاعلات البسيطة الأخرى بين العناصر. كما أظهر الباحثان **هوانغ ومورا (1996)** أنه يمكن اعتبار الوسائط غير المتجانسة جدًا. وعلاوة على ذلك، وجد الباحث **تومي وآخرون (2002)** أن الوسط المكسور يمكن اعتباره أيضًا.

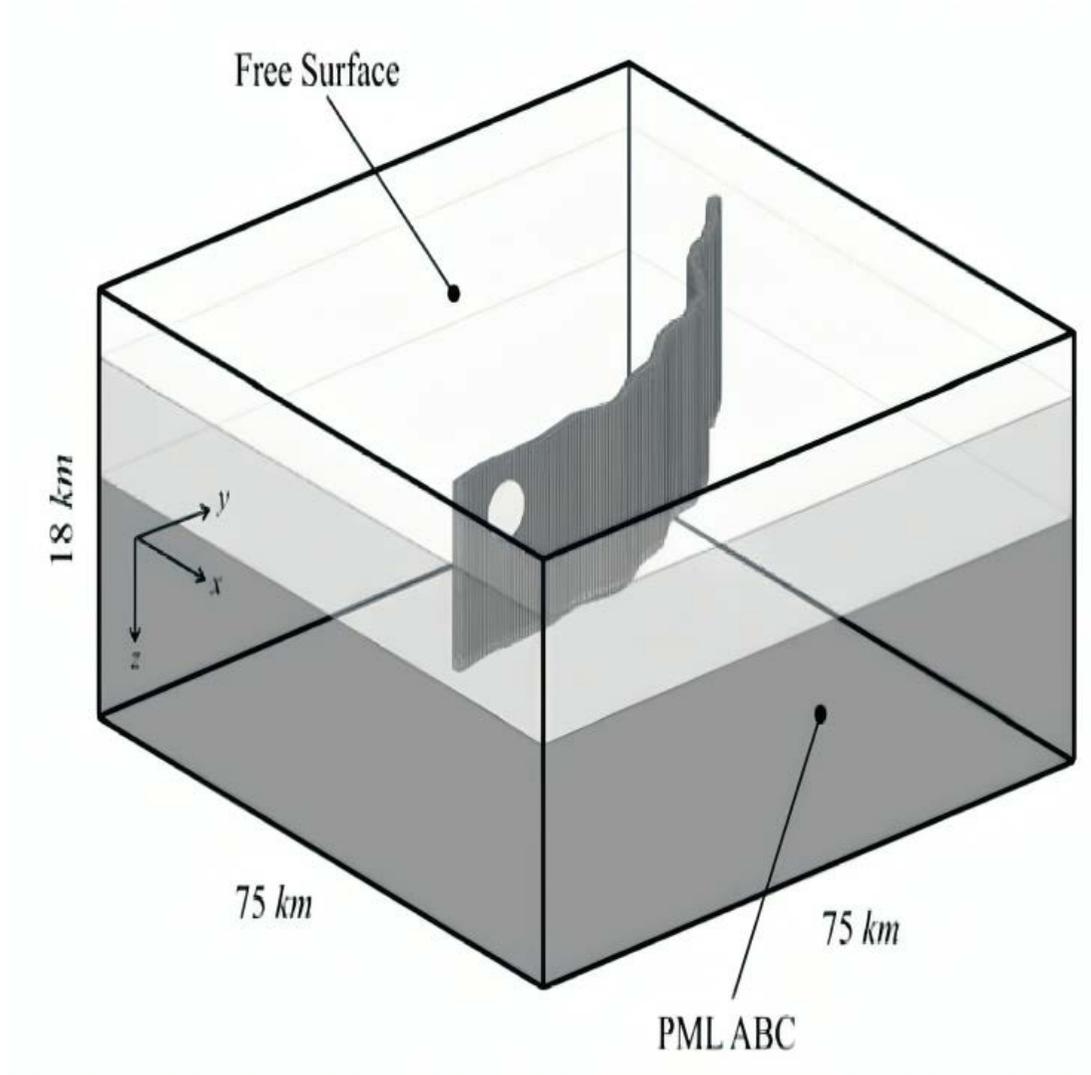
تبدو هذه الطريقة -على حساب موارد الحاسوب- واعدة لنمذجة انتشار الموجات الزلزالية للسلوكيات الميكانيكية المعقدة للوسائط.

باختصار، مع زيادة موارد الحاسوب بشكل كبير، فإن إجراء عمليات محاكاة دقيقة لانتشار الموجات الزلزالية في الوسائط غير المتجانسة المعقدة بما في ذلك المصادر الزلزالية الممتدة هو هدف يمكن تحقيقه في المستقبل القريب.





يعرض الشكل الآتي التكوين الهندسي لنمذجة انتشار الموجات داخل وسط متعدد الطبقات لزلازل لاندرز. سطح الصدع عبارة عن سطح ثنائي الأبعاد معقد عمودياً يتناسب مع آثار التمزق على السطح الحر.



رسم تخطيطي لسطح الصدع لزلازل لاندرز المضمن في هيكل متعدد الطبقات.



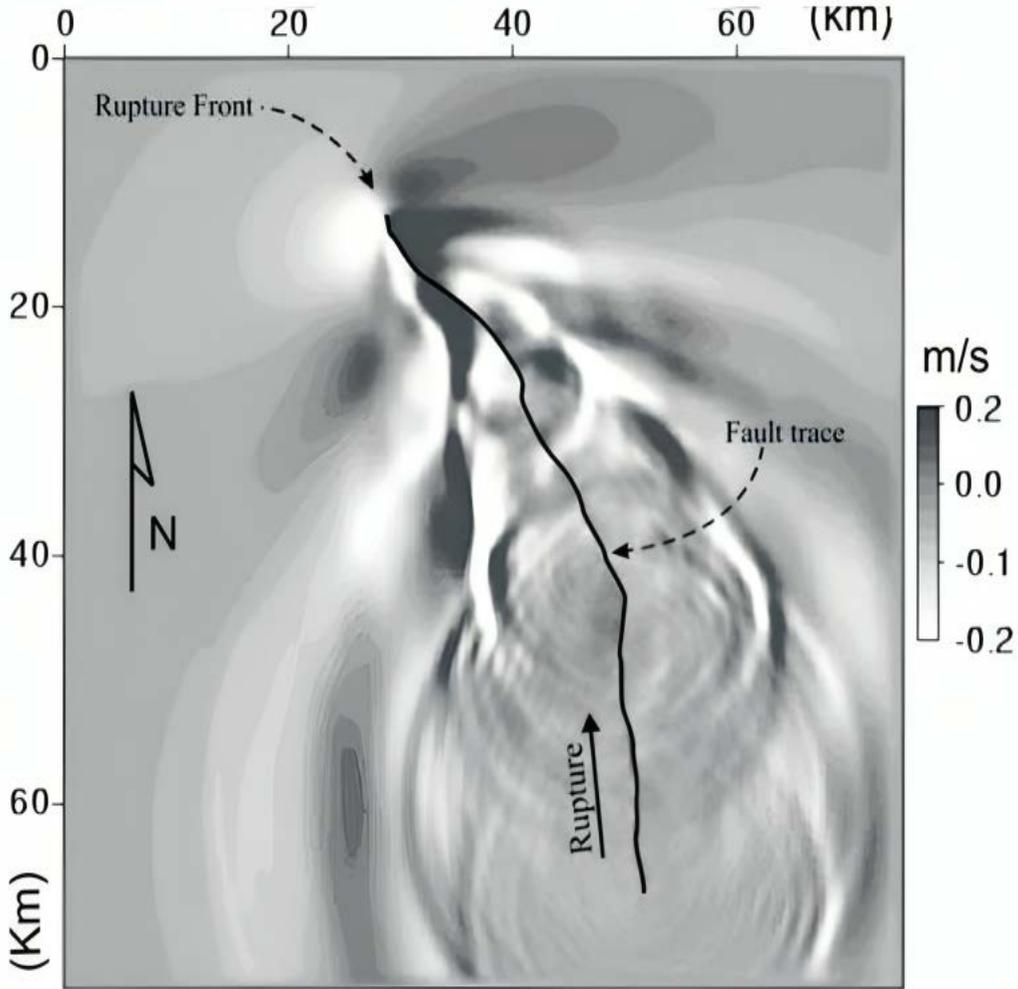


كما يعرض الشكل الآتي سرعة الجسيمات الشمالية المحسوبة على السطح الحر للأرض بالنسبة لزلزال لاندرز. تجري المحاكاة بواسطة رمز فرق محدود ثلاثي الأبعاد باستخدام الشروط الحدودية كما حددها **كروز أتينزا وفيريو (2004)**.

المعالم الديناميكية هي تلك التي حددها الباحث بيرات وآخرون (2001). يمكن للمرء أن يرى موجات صدمية محتملة تتولد عندما يتحرك طرف الشق بسرعة تمزق أعلى من سرعة موجة القص. يمكن حساب مخططات الزلازل الاصطناعية في أي مكان في النموذج. التفاعل الديناميكي بين منطقة تمزق الصدع وعدم التجانس المتوسط يزيد بشكل كبير من تعقيد مخططات الزلازل.

لسوء الحظ، يجب أن يجمع تقدير الحركة الأرضية بين هذه المحاكاة والشكوك في معرفتنا بالوسط وفي تعريفنا للمصادر الزلزالية المحتملة. من الأهمية بمكان استراتيجية تقدير التباين القادمة من معرفتنا وفهمنا المحدودين.





سرعة الجسيمات العمودية المحسوبة على السطح الحر للأرض في وقت معين بعد بدء النواة للزلازل لاندروز. المعالم الديناميكية هي التي تنبعث منها موجات الصدمة من منطقة تمزق الصدع.





• القياس الكمي لتشتت تقدير الحركة الأرضية

تُصنف حالات عدم اليقين هذه عادة في فئتين: عدم اليقين المعرفي يرتبط بمعرفة غير الكاملة (وسيلة الانتشار على سبيل المثال)، ويجب تقليله في المستقبل، في حين يعتبر التباين العشوائي مرتبطاً ببعض العمليات شبه العشوائية أو العشوائية (تتعلق، على سبيل المثال، بعدم تجانس المصدر الذي لا يمكن التنبؤ به، الطول الموجي القصير)؛ قد يتغير هذا التمييز في المستقبل لأنه من المأمول أنه بعد **100 عام** من الوقت الحالي، ستزداد المعرفة كثيراً بحيث إنه سيفسر بعض التباين الذي يعتبر حالياً 'شبه عشوائي' بشكل حتمي. يؤدي كلا النوعين إلى تباين كبير في تقديرات الحركة الأرضية، والتي يجب تقديرها، مع أنها ليست مهمة سهلة على الإطلاق.

• نهج النمذجة الحتمية ودراسات الحساسية

ومن ثم فإن قدرًا كبيرًا من التباين المعرفي ينشأ من معرفتنا الضعيفة بالوسيط والمصدر في نهج النمذجة الحتمية. إن النمذجة «الدقيقة» لتأثيرات الانتشار تتطلب بالفعل معرفة البنية الجيولوجية بمقياس دقة يبلغ عُشر الطول الموجي.

وللأسف، لا يمكن تحقيق ذلك عملياً، وربما سيبقى كذلك لعقود من الزمن. لذلك، يجب على المرء أن يسمح بنموذج جيولوجي عشوائي له خصائص متوسطة معروفة وهندسة متوسطة وتقلبات مكانية كبيرة.





يعد تأثير هذه التقلبات ضرورياً في انتشار مجال الموجة نظراً لأنها تتحكم في التشتت المتعدد عند الترددات العالية (ومن ثم التوهين مع مكان وزمان الإشارة)، وموقع التداخلات البناءة والمدمرة، وربما أيضاً بعض التركيز أو تأثيرات إزالة التركيز، وهي ظواهر لها عواقب ملحوظة على الترددات ذات الاهتمام الهندسي.

عادة ما يجري التعامل مع النهج الممكنة القائمة على النمذجة العددية المباشرة بطريقتين؛ عادة ما تعتبر النظريات الكلاسيكية لانتشار الموجات في الوسائط العشوائية وسائط مرجعية (غالباً ما تكون متجانسة) مع توزيع عشوائي للتشتت التي غالباً ما تعمل كمشتتات مفردة، في حين أن البعض الآخر يعتبر وسطاً متوسطاً غير متجانس مع تقلبات مكانية قوية. تمثل هذه الأساليب افتراضات فيزيائية مختلفة بشكل أساسي وتستخدم تقنيات محاكاة مختلفة.

يمكن أيضاً تقديم تعليق مماثل لبعض معالم المصدر حيث تؤدي حالات عدم اليقين في موقع نقطة النواة بالإضافة إلى تطور وقت الانزلاق اللاحق إلى تأثيرات اتجاهية مختلفة تماماً للمصادر الحركية.

وبالمثل، فإن موقع الاختلافات أو الحواجز بالإضافة إلى قوانين الاحتكاك المختلفة قد يسمح بنمط إشعاع مختلف للمصادر الموسعة الديناميكية. يتطلب تقدير العواقب على معالم الحركة الأرضية حالياً تشغيل العديد من النماذج المختلفة لالتقاط التباين الكامل لخصائص المصدر، الأمر الذي قد يصبح سريعاً باهظاً من حيث تكلفة وقت الحاسوب.





بتطبيق نهج الحساسية هذا على تقنية وظيفة الأخضر التجريبي **Empirical Green's Function Technique**، اقترح الباحث بافيتش وآخرون (2000) طريقة للحد من عدد عمليات التشغيل من خلال استخدام تقنية «أخذ عينات المكعب الزائد اللاتينية» **Latin Hypercube Sampling** لتقدير عدم اليقين «القياسي» في معالم المصدر، والتباين النهائي الناتج في خصائص الحركة الأرضية أكبر قليلاً من ذلك الذي جرى ملاحظته مباشرة في البيانات (على سبيل المثال في الانحراف المعياري لـ «علاقات التوهين التجريبية» **Empirical Attenuation Relationships**).

مهما كانت الاتجاهات التي تجري محاكاتها في الحركة الأرضية الاصطناعية، يجب أن تحاكي قانون التوهين المستنتج من الملاحظات، وتقلبها أيضاً (الانحراف المعياري). ومع زيادة عدد نقاط المراقبة وإعطاء قيود أفضل على قانون التوهين المجهز من مخططات الزلازل المسجلة، قد يأمل المرء في إمكانية إعادة إنتاج ميزات المصدر والانتشار في قوانين التوهين باستخدام النمذجة داخل منطقة التباين.

• تقديرات التباين في المناهج التجريبية

وبما أن المعرفة بالوسيط والمصدر قد تكون ضعيفة، فإن الإستراتيجية الواعدة تأتي من استخدام الإشارات المسجلة، إما على أساس موقع محدد (تقنية وظيفة جرين التجريبية)، أو بطريقة إحصائية.

هذا الأخير هو في الواقع الممارسة الهندسية القياسية، ويرتبط حالياً بشكوك محددة وكمية إلى حد ما («علاقات التوهين» **Attenuation Relationships** أو





«معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية» **Ground-Motion Prediction Equations** - وهي **GMPE** - وانحرافها المعياري **(Standard Deviation)**.

يجري اشتقاق معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية هذه من خلال التوافق المربع الأدنى بين عدد قليل من معالم الحركة الأرضية البسيطة التي أمكن الحصول عليها من مجموعة مختارة من تسجيلات (الحركة القوية)، ومعادلة عامة تمثل الاعتماد على القدر والمسافة، وربما ظروف الموقع.

تتوفر حالياً المئات من معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية هذه في الأدبيات العلمية، اعتماداً على مجموعة البيانات الأصلية، والشكل الوظيفي العام الذي جرى اختياره لالتقاط الاعتماد على القدر والمسافة، والإجراء المناسب.

بالإضافة إلى عدم اليقين المتأصل **(العفوي)** المضمن في الانحراف المعياري، قد يؤدي اثنان من معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية المختلفين إلى تقديرات أرضية مختلفة إلى حد كبير لقيم القدر والمسافة وظروف الموقع نفسها.

ومن ثم فإن تقدير حركات الأرض باستخدام مثل هذه المعادلات يتطلب بعض الحذر والتحذيرات. للبدء، يجب أن تكون المعالم المستقلة المستخدمة، أي القدر ونمط الصدع ومقاييس المسافة وفئات الموقع، متوافقة مع مجموعة البيانات الأصلية لكل معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية. ويتضمن هذا غالباً بعض تحويلات المعالم (مما يؤدي أيضاً إلى حالات عدم اليقين المناسبة التي ينطوي عليها كل تحويل). وقد تم اقتراح عدة إجراءات لإجراء هذه التحويلات.





ومن ثم، من أجل التقاط الشكوك المعرفية حقًا ضمن نهج معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية، لا ينبغي للمرء أبدًا استخدام معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية لوحدها، ولكن دائمًا استخدام عدة أكثر ملاءمة لحالة الفرد الخاصة: اقترح كوتون وآخرون (2005) إجراءً لاختيار هذه «الأفضل» من معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية.

استخدم الجيل الأول من « معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية » هذه معدل الاضمحلال المكاني المستقل عن القدر، ومن ثم فهو مناسب فقط لنطاق قدر محدود.

إن الوصف المناسب لظروف الموقع ينبغي -من حيث المبدأ- أن يقلل من تشتت البيانات، ولكن هناك مصدران إضافيان لعدم اليقين: الأول يكمن في تصنيف المواقع بسبب قلة المعلومات المتوفرة. والثاني، حتى لو جرى تصنيف المواقع بشكل صحيح ضمن كل فئة، فمن الممكن حدوث تضخيمات مختلفة للموقع بسبب القيود الجوهرية للفئات البسيطة المستخدمة بالضرورة، وكذلك التباين غير المتوقع في استجابة الموقع.

الجمع بين الأدوات الحتمية الموجودة المستخدمة لتقدير الحركة الأرضية مع إجراء التحسين لمعايرة المعالم العددية الرئيسية (على سبيل المثال للنموذج التأسيسي) والدراسة الحدودية، من أجل إجراء عمليات محاكاة تتضمن العديد من المتغيرات والقيود (الخطية وغير الخطية) التي تعيد إنتاج الاعتماد والتباين الشامل الملحوظ (معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية)، وهو بالتأكيد اتجاه لم يجر استكشافه بشكل كافٍ بعد.





• النهج الاحتمالي

في ضوء التطبيقات الهندسية، هناك بلا شك ميل قوي لتفضيل تقديرات المخاطر الاحتمالية على التقديرات الحتمية البحتة (حتى مع دراسات الحساسية وتقييم حالات عدم اليقين): ويسمح هذا النهج بالفعل، عندما يرتبط بمنحنيات الهشاشة، بتقييم أفضل لمستوى المخاطر النهائي. في الأساس، يؤدي تحليل المخاطر الزلزالية الاحتمالية إلى «منحنيات الخطر» التي تمثل الاحتمال السنوي لمعلمة الحركة الأرضية (على سبيل المثال، **PGA**) لتجاوز مستوى معين في موقع معين.

يتضمن حساب حالات عدم اليقين في دراسات **PSHA** كلا من الحساب التلقائي لتشتت معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية، والشكوك المعرفية من خلال الأشجار المنطقية ذات الفروع المختلفة المقابلة لافتراضات «معقولة» مختلفة، والتي يجري تعيين أوزان مختلفة لها والتي قد تختلف بالإضافة إلى ذلك من خبير إلى آخر.

إن مثل هذه الأساليب، التي تبدو جذابة ومقنعة، تواجه في الواقع عدداً من الصعوبات التي يجب حلها في أسرع وقت ممكن:

- إن الفصل بين الشكوك المعرفية والتقلبات العشوائية ليس واضحاً تماماً في التطبيقات العملية، وهناك مخاطر «الحساب المزدوج» **Double Counting** لبعض الشكوك - وهو ما يؤدي في النهاية إلى تقديرات متشائمة جداً.
- قد يؤدي التطبيق على مستويات احتمالية منخفضة جداً (تصل إلى 10^{-5} ، أو حتى 10^{-7}) إلى قيم غير واقعية تماماً (على سبيل المثال، ما يصل إلى 5





غرام لـ pga ، و **10 غرام** للتسارع الطيفي). ويرتبط هذا ارتباطاً وثيقاً بالشكل الدقيق لتوزيع الذيل للبقايا في معادلات التنبؤ بالحركة الأرضية، والذي لا يزال غير معروف بمجموعة البيانات المتاحة حالياً. الاتجاه الآخر للجهود المستقبلية هو البحث عن الحدود العليا المادية للحركة الأرضية الزلزالية.

- التحدي الآخر هو تطوير طريقة «لمعايرة» دراسات **PSHA** على البيانات المتاحة، أي التسجيلات الآلية على مدى فترة قصيرة جداً (لا تزيد عن بضعة عقود)، وكثافة (غامضة) على مدى بضعة قرون: لكن هل من الممكن أن يكون هناك نموذج صالح على فترات الإرجاع القصيرة والطويلة ويمكن معايرته على جانب واحد فقط واستخدامه على الجانب الآخر؟

أخيراً، إحدى أصعب القضايا هي التوفيق بين وجهات نظر علماء ومهندسي الأرض إن أمكن: الأولون سعداء جداً وفخورون إذا تمكنوا من التنبؤ بالملاحظات ضمن عامل **2**، في حين أن القيود الاقتصادية تجبر الأخيرين على «تحسين» تصميمهم، الأمر الذي يقودهم إلى مطالبة علماء الزلازل بالتنبؤ بالحركة الأرضية في غضون **10 - 20 %**.





الإنذار المبكر بالزلازل وآفاق التطبيقات الهندسية

إنّ المستقبل المنظور لأنظمة الإنذار المبكر بالزلازل (EEWS) هو استخدامها كأداة لإدارة المخاطر الزلزالية والتخفيف من آثارها في الوقت الحقيقي. يبدو أن إمكانية تطبيق نظام الإنذار المبكر بالزلازل ترتبط أكثر بالتفعيل الفوري لتدابير السلامة للأنظمة الحيوية بدلاً من كونها تنبيهاً واسع النطاق للجمهور.

يتطلب إخلاء المباني أوقات تحذير من غير المرجح أن تكون متاحة في العديد من المناطق الحضرية المهددة بمخاطر الزلازل، في حين أن حماية الأنظمة الحيوية قد تساعد بشكل كبير في تقليل الخسائر اللاحقة لحدث كارثي وزيادة مرونة المجتمعات في مواجهة الزلازل.

يعد علم الزلازل في الوقت الفعلي (RTS)، والذي يتكون من طرائق وإجراءات للتقدير السريع للزلازل وميزات الحركة الأرضية اللاحقة بناءً على القياسات التي أمكن إجراؤها في الثواني القليلة الأولى من الموجات، محوراً لقدر كبير من الأبحاث.

من حيث المبدأ، قد يعزز ذلك إمكانات شبكات الاستشعار الزلزالية الإقليمية لتطبيقات خاصة بالموقع، وبعبارة أخرى: نظام الإنذار المبكر بالزلازل الهجين Hybrid EEW. ومن ثم فإن التحدي اللاحق للإنذار المبكر وهندسة الزلازل هو شبكات الزلازل الموزعة جغرافياً لحماية العديد من الأنظمة الحيوية وخطوط الحياة في الوقت نفسه.





وتتعلق القضية الرئيسية بعدم اليقين في تقدير سمات الحدث. لذلك، لم يعد هدف الأداء وعامل الجدوى لنظام الإنذار المبكر بالزلازل يقتصر فقط على تعظيم وقت التحذير ولكن أيضاً معايير عتبات الإنذار وقواعد القرار، في نهج احتمالي كامل، من أجل تحقيق أقصى قدر من تقليل الخسارة بعد القرار.

• نظام الإنذار المبكر بالزلازل المحدد مقابل نظام الإنذار المبكر بالزلازل الإقليمي

العناصر الأساسية لنظام الإنذار المبكر بالزلازل هي شبكة من الأجهزة الزلزالية، ومحطة (محلية أو مركزية) تعالج البيانات المقاسة بواسطة أجهزة الاستشعار وبنية تحتية للإرسال تنشر الإنذار للمستخدمين النهائيين لبدء إجراءات أمنية شخصية أو تلقائية.

يعتبر نظام الإنذار المبكر بالزلازل حلاً جذاباً ومكلفاً إلى حد ما لتخفيف المخاطر، وترتبط جاذبيته بتخفيض إجمالي الخسائر المنتجة في منطقة كبيرة أو في المرافق الحيوية جداً.

يمكن تمييز نظام الإنذار المبكر للزلازل من خلال تكوين شبكته الزلزالية على أنها إقليمية أو خاصة بالموقع. يتكون نظام الإنذار المبكر بالزلازل الإقليمي من شبكات زلزالية واسعة تغطي جزءاً من المنطقة التي من المحتمل أن تكون مصدراً لزلزال كارثي و/أو المنطقة الحضرية المعرضة للضربة.

تتم معالجة البيانات المسجلة بواسطة الأجهزة الزلزالية بشكل أكبر لاسترداد معلومات مثل القدر و/أو الموقع أو آلية الصدع أو الاستجابة الطيفية. يمكن استخدام هذه المعلومات لتقدير مستوى الاهتزاز في المنطقة المصابة. قد تتطلب





مثل هذه المعالجة وقتاً طويلاً، وفي جزء كبير من المنطقة، تسمى المنطقة العمياء **Blind Zone**، نادراً ما يصدر الإنذار قبل وصول الحركة الأرضية.

الأنظمة الإقليمية مخصصة بشكل أساسي لتطبيقات مثل خرائط الهزات، وهي عبارة عن توزيعات إقليمية لهزات الأرض متاحة مباشرة بعد الحدث لإدارة الطوارئ على سبيل المثال، المساعدة في توجيه فرق الإنقاذ في المناطق التي من المتوقع أن تتعرض لأكبر هزة وهي لذلك من المتوقع أن تتكبد أكبر الخسائر.

في هذه الحالة يعمل النظام في الوقت الحقيقي تقريباً كنظام استجابة سريعة يقدم تصنيفاً آخر لنظام الإنذار المبكر بالزلازل من خلال مقياس زمني للتشغيل.

عندما يتمكن النظام من نشر الإنذار أثناء الحدث، قبل أن تصل الحركة الأرضية إلى بعض المواقع ذات الأهمية، فإنه يعمل في الوقت الفعلي لأغراض التنبيه الزلزالي.

في حالات قليلة فقط سيكون لدى الأنظمة الإقليمية الوقت الكافي لمعالجة البيانات ونشر إنذار الإخلاء. وهذا هو الحال بالنسبة لنظام الإنذار المبكر في مكسيكو سيتي، حيث منطقة مصدر الزلازل معروفة بوضوح وبعيدة بما فيه الكفاية، بحيث يمكن لوسائل الإعلام تحذير قطاعات كبيرة من السكان.

في مكسيكو سيتي، ترتبط المدارس العامة والوكالات الحكومية مباشرة بنظام الإنذار. نظام الإنذار الزلزالي هو نظام إنذار مبكر للزلازل الكبيرة التي يكون مصدرها منطقة الاندساس على ساحل المحيط الهادئ. تتكون شبكة أجهزة الاستشعار الزلزالية من **12 محطة** ميدانية رقمية قوية الحركة تقع على امتداد **300 كيلومتر** من ساحل غيريرو.





تشتمل كل محطة ميدانية على جهاز حاسوب يقوم بشكل مستمر بمعالجة النشاط الزلزالي الذي يحدث ضمن منطقة شعاعية تبلغ **100 كيلومتر** حول كل محطة. تتكون البنية التحتية للإرسال من محطة ترحيل راديو مركزية وثلاث محطات ترحيل تقع بين الساحل ومدينة مكسيكو. يلزم ثانيتين حتى تصل المعلومات الخاصة بالحدث إلى مدينة مكسيكو. تتم معالجة البيانات الواردة تلقائياً لتقدير قدر الحدث وإصدار تنبيه عام (من المحتمل أن يغطي النظام 4.4 مليون شخص). ويقوم النظام بنشر التحذيرات على الجمهور لجهات محددة عبر محطات الراديو التجارية وآليات التنبيه الصوتي عبر أجهزة استقبال مصممة خصيصاً لذلك.

في حين أن الأنظمة الإقليمية تعمل بشكل مباشر على تحسين مرونة المجتمعات في مواجهة الزلازل، فإن نظام الإنذار المبكر للزلازل الخاص بالموقع مكرس لتعزيز هامش الأمان في الوقت الفعلي لأنظمة هندسية مهمة محددة مثل محطات الطاقة النووية أو شرايين الحياة أو البنى التحتية للنقل، مما يخفف من المخاطر الزلزالية عن طريق تقليل المخاطر الزلزالية. تعرض المنشأة من خلال إجراءات السلامة الآلية.

إن شبكات الإنذار المبكر للزلازل المحددة أصغر بكثير من تلك الخاصة بالأنواع الإقليمية، وتغطي فقط المناطق المحيطة بالنظام مما يشكل حاجزاً أمام الموجات الزلزالية. ويعتمد موقع أجهزة الاستشعار على المدة اللازمة لتفعيل إجراءات السلامة قبل وصول المرحلة الزلزالية الأكثر نشاطاً إلى الموقع.

في أنظمة التنبيه الزلزالي هذه، يصدر الإنذار عادةً عندما تتجاوز الحركة الأرضية للمرحلة **S** عند واحد أو أكثر من أجهزة الاستشعار عتبة معينة ولا توجد محاولة لتقدير ميزات الحدث.



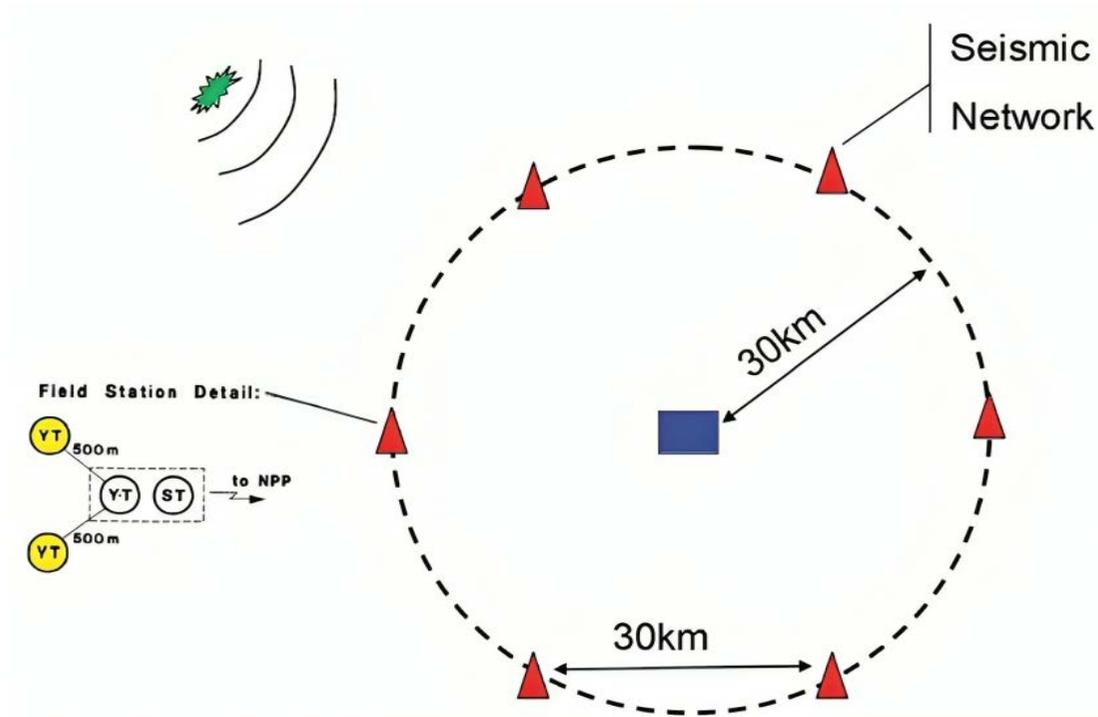


مع أن معرفة المعالم الزلزالية أمر مرغوب فيه، إلا أنها ليست ضرورية لإصدار الإنذار في المرافق الحيوية. وذلك لأن الأخير يستغرق وقتاً طويلاً وأيضاً لأن عدم اليقين المتعلق بانتشار الموجات الزلزالية معتدل بشكل عام نظراً لأن المسار بين الشبكة والموقع محدود.

لا تعتبر الأخطاء في قرار التنبيه مشكلة كبيرة حيث يُفترض دائماً أن خطر فشل النظام أكبر من الخسائر المرتبطة بالإنذار الكاذب. وبالمناسبة، تجدر الإشارة إلى أنه إذا كان نظام الإنذار المبكر للزلازل مطلوباً بشكل جوهري، فهذا يعني أن الإنذارات الفائتة أكثر أهمية من الإنذارات الكاذبة.

ومن بين الأنظمة الخاصة بالموقع، هناك مثال نموذجي هو محطة إجنالينا للطاقة النووية في ليتوانيا. صمم النظام للكشف عن الزلازل التي قد تكون مدمرة ولتوفير إنذار قبل وصول موجات القص إلى المفاعل. تتكون الشبكة الزلزالية من ست محطات جرى تركيبها على مسافة 30 كم من محطة توليد الكهرباء (كما في الشكل الآتي).





مخططات إجنالينا لنظام الإنذار المبكر للزلازل.

قد يؤدي وقوع زلزال مركزه خارج سياج المحطات إلى إطلاق إنذار قبل نحو **4 إلى 8 ثوانٍ** من وصول الحركة الأرضية إلى المفاعل. وبما أن الوقت المطلوب لإدخال قضبان التحكم هو ثانيتان، فيمكن تأمين المفاعل قبل وصول الزلزال.

جرى ضبط عتبة الإنذار على قيمة تسارع قدرها **0.025** من تسارع الجاذبية الأرضية. يتم اتخاذ قرار التبيه وفقاً لمنطق «اثنين من ثلاثة»، وهو من الناحية الإحصائية نظام مواز جزئي **Partial Parallel System** يوفر المستوى نفسه للحماية ضد الإنذارات الفائتة والكاذبة.





وكما هو موضح أدناه، فإن أي عتبة تحمل معدلات إنذارات كاذبة أو فائتة، والتي يجب تقييمها لمعايرة العتبة قبل استخدام نظام التنبيه الزلزالي لبدء إجراءات السلامة مثل تنشيط قضيب التحكم.

الجوانب التي يجب أخذها في الاعتبار في هذا الصدد هي الخسائر المقبولة المتعلقة بكل من أخطاء القرار المحتملة. ففي حالة الإنذار الكاذب، على سبيل المثال، قد يكون مرتبطاً بتوقف المنشأة عن العمل.

مثال آخر لنظام الإنذار المبكر للزلازل هو حماية قطار ثوكو شينكانزن **Thoku Shinkanzen** عالي السرعة في اليابان. يوضع سياج المحطات الزلزالية على طول الساحل لحماية الأنظمة من الأحداث البحرية (كما في الشكل الآتي). توجد مجموعة ثانية من الأدوات على طول المسار لحماية القطارات من الزلازل.



مخطط حماية قطار ثوكو شينكانزن.



ويمنع النظام القطار من السير على الجسور أو في الأنفاق التي يحتمل أن تتضرر بسبب الزلزال، مما قد يتسبب في خروج كارثي عن مساره. في الأصل جرى تصميم النظام، كما هو الحال في محطة توليد الطاقة إجنالينا، لإصدار إنذار عندما يتجاوز تسارع الموجات S المسجلة في المحطات الساحلية الحد الأدنى؛ يمكن بعد ذلك إيقاف القطار وفي النهاية فحص السكة الحديدية بحثاً عن الأضرار، لكن المهلة المتاحة نحو 20 ثانية.

تطلب نظام الإنذار المبكر للزلازل لقطار طوكيو-موريوكا شينكانزن دراسة مكثفة من أجل تحسينه. تسبب النظام الأصلي في تأخيرات متكررة وإلغاء القطارات بسبب الإنذارات الكاذبة. توضح الدراسة كيف يمكن للنهج الهندسي تحسين أداء النظام: تحسين عتبات الإنذار من خلال النظر في الهشاشة الزلزالية للمسار الذي قد يتعرض للضرر أثناء الزلزال يمكن أن يقلل المعدل السنوي للإنذارات الكاذبة بعدة أوامر من حيث القدر.

• علم الزلازل في الوقت الحقيقي والأنظمة الهجينة

تتطلب أنظمة الإنذار المبكر بالزلازل الحديثة الخاصة بالموقع، والتي تعمل كأنظمة إنذار زلزالي، شبكة زلزالية مخصصة حول المنشأة لحمايتها، في حين تستخدم الشبكات الإقليمية التي تراقب منطقة مصدر زلزالي محتملة، بسبب الجهد الحسابي المطلوب، في الغالب أنظمة الاستجابة السريعة، وإنتاج خرائط اهتزازية للتأهب لحالات الطوارئ.





ونظراً للتطور الكبير الذي شهدته الشبكات الإقليمية في جميع أنحاء العالم في السنوات الأخيرة، فإن مسألة استخدام نظام الإنذار المبكر للزلازل للتطبيقات الخاصة بالموقع آخذة في الارتفاع.

قد تكون الخطوة الرئيسية لنظام الإنذار المبكر للزلازل هي استخدام الشبكات الإقليمية لحماية الأنظمة الحيوية المتعددة و/أو المجتمع ومن ثم الاستخدام المختلط لطرق الإنذار الإقليمية وفي الموقع.

الإنذار المبكر هو محور التركيز الحالي لجهود بحثية كبيرة. قام علماء الزلازل مؤخراً بتطوير عدة طرائق لتقدير قدر الحدث (**M**) استناداً إلى معلومات محدودة عن موجات **P**، مثل الثواني القليلة الأولى من تسجيل السرعة.

وبالمثل، يمكن تقدير الموقع، ثم المسافة من المصدر إلى الموقع (**R**)، من خلال تسلسل محطات الشبكة التي جرى تشغيلها أثناء الزلزال المتطور مع عدم اليقين الذي لا يذكر بعد بضع لحظات فقط.

ولذلك، فمن الممكن افتراض أن التقديرات في الوقت الحقيقي لـ **M** و **R** متاحة. قد يؤدي ذلك إلى تحسين الأداء التقليدي لنظام الإنذار المبكر للزلازل، مما يوفر وقتاً إضافياً للتحذير ويقلل المنطقة العمياء.

ومع ذلك، يمكن أيضاً استخدام هذه المعلومات لتصميم تطبيقات هندسة نظام الإنذار المبكر للزلازل. على سبيل المثال، يمكن أن توفر تقديرات **M** و **R** تنبؤاً بالحركة الأرضية في الموقع، والتي يمكن إجراؤها قياساً على تحليل المخاطر الزلزالية الاحتمالية (**PSHA**) الشائع. وينتج عنه تحليل المخاطر الزلزالية الذي يعكس المعلومات في الوقت الحقيقي.

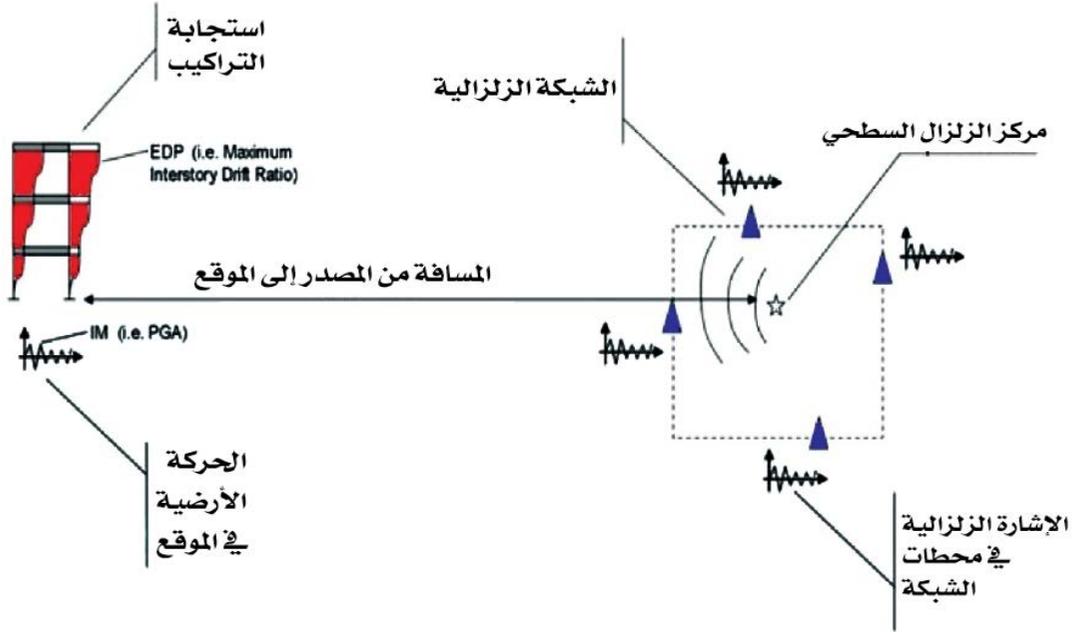




إن حساب الخطر الزلزالي بشكل مشروط (بالمعنى الاحتمالي) على نظام الإنذار المبكر للزلازل يسمح له بالأخذ في الاعتبار بشكل صحيح جميع حالات عدم اليقين المتعلقة بكل من تقديرات الشبكات الزلزالية وكذلك انتشار الموجات الزلزالية من منطقة المصدر إلى المواقع ذات الاهتمام بواسطة قانون التخفيف المناسب.

ومن ثم، يمكن حساب الأداء أو حتى الخسائر المتعلقة بالهيكل أو النظام الهندسي المعني. يمكن تحسين معظم أنواع التحليلات بحيث لا تتطلب وقتاً إضافياً كبيراً للمعالجة. يظهر في الشكل الآتي مخطط للتطبيق الهجين لشبكة إقليمية للإنذار المبكر بالزلازل الخاصة بالهيكل.





شبكة إقليمية للإنذار المبكر بالزلازل الخاصة بالهيكل.

إن استخدام علم الزلازل في الوقت الحقيقي في إطار هندسة الزلازل يعني تحديث المعرفة بالمخاطر الزلزالية من البيانات التي تجمعها الشبكة. وهذا يسمح بإعادة تقييم المخاطر الزلزالية المشروطة بتدابير الشبكة لأغراض إدارة المخاطر.

في الواقع، يمكن تطبيق جميع مناهج المعرفة وصنع القرار التي جرى تطويرها في إطار هندسة الزلازل القائمة على الأداء (PEER 2004) على الإنذار المبكر، مما يساعد على تصميم مثل هذه الأنظمة على أساس كمي ومتسق.



من الواضح أن دالة الكثافة الاحتمالية للاستجابة الهيكلية و/أو الخسائر المتوقعة اللاحقة، المشروطة بقياسات الأجهزة الزلزالية، عند وقوع حدث ما، تحوي على أعلى مستوى من المعلومات المتاحة.

يسمح تحليل المخاطر في الوقت الفعلي في حالة نظام الإنذار المبكر للزلازل الهجين، من حيث المبدأ، بتطبيق الشبكات الإقليمية على أنظمة محددة متعددة في نفس الوقت مثل الأنظمة الحيوية وشريان الحياة، وربما يعطي أساسًا كميًا لاتخاذ القرارات الآلية.

وعلى النقيض من نهج معايرة نظام الإنذار المبكر للزلازل الحالي، فإن ضبط عتبة الإنذار من خلال التنبؤ بالعواقب يعد أكثر اتساقًا مع النهج الهندسي لإدارة المخاطر الزلزالية.

قد تتغلب الأنظمة الهجينة المصممة بهذه الطريقة أيضًا على الحد الجوهري لنظام الإنذار المبكر للزلازل الحالي. وتساعد الأخيرة حاليًا في تقليل الخسارة المرتبطة بالتعرض (على سبيل المثال، الضحايا في حالة الإخلاء) ولكنها لا تساعد في تقليل الخسائر الاقتصادية بسبب الأضرار الهيكلية في المباني والبنية التحتية والأنظمة الهندسية الأخرى.

يبدو حاليًا أنه من الممكن اتخاذ إجراءات في الوقت الفعلي لتقليل نقاط الضعف الهيكلية لأنظمة معينة. على سبيل المثال، إذا كان تحليل المخاطر في الوقت الفعلي يسمح بتقدير أطراف الاستجابة في الموقع قبل أن تصل الحركة الأرضية، فإن أجهزة التحكم شبه النشطة، والتي تحتاج إلى ميلي ثانية إلى ثوانٍ لضبطها، قد تغير خصائص اهتزاز الهيكل وفقًا لذلك.





• إمكانية تطبيق نظام الإنذار المبكر للزلازل

يمكن تعريف المخاطر الزلزالية، مع فصل الأسباب والآثار، على أنها مزيج من: الخطر والضعف والتعرض. تتكون إدارة المخاطر من:

1. تخفيف المخاطر عن طريق الضعف أو تقليل التعرض.
 2. الاستعداد للطوارئ (كما في الشكل الآتي).
 3. والأخيرة هي قضية في الوقت الحقيقي تقريباً؛ يتكون الأول من استراتيجيات تكون عادة متوسطة المدى (أي التعديل التحديثي الزلزالي للهياكل والبنى التحتية) أو إجراءات طويلة الأجل (أي تخطيط استخدام الأراضي الحضرية أو تطوير معايير التصميم المناسبة).
- من المراجعة الموجزة الواردة في الأقسام السابقة، من الواضح أن نظام الإنذار المبكر للزلازل قد يؤدي دوراً في كلتا السياستين، سواء في تقليل الخسائر في الأرواح والممتلكات أو توجيه عمليات الإنقاذ.

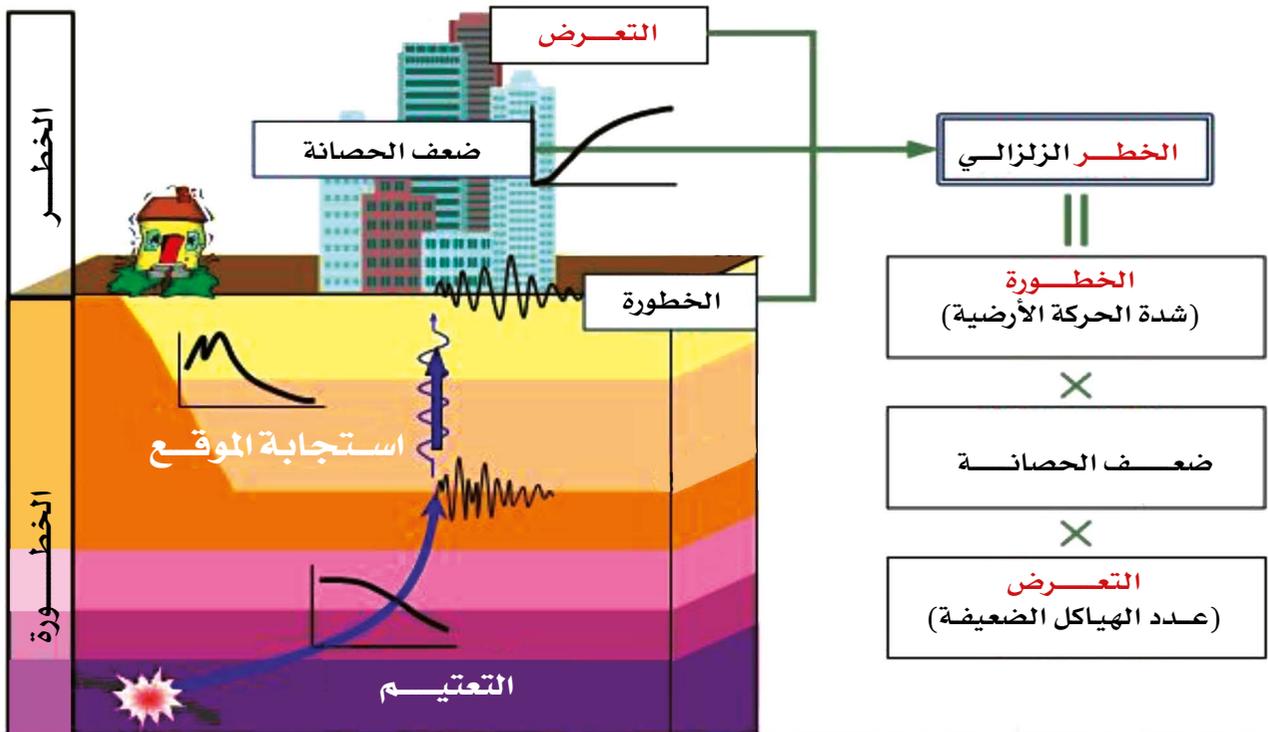




كيف نستطيع تخفيف الخطر؟

$$\text{الخطر} = \text{الخطورة} \times \text{التعرض} \times \text{ضعف الحصانة}$$

نستطيع تحسين قدراتنا على مراقبة وتوقع المخاطر
 زيادة الوعي بمواجهة المخاطر عن طريق المجتمعات
 الاستفادة العظمى يمكن الحصول عليها عن طريق تقليل ضعف حصانة المخاطر الطبيعية الطبيعية



الخطر الكلي يتم تحديده بواسطة شدة الحركة الأرضية وضعف الحصانة وعدد التراكيب المباني المتضررة





يتعامل النهج التقليدي لتخفيف المخاطر من قبل نظام الإنذار المبكر للزلازل مع تلك المرافق والعمليات حيث يمكن للاستجابة السريعة أن تساهم في تقليل القيمة المكشوفة. على سبيل المثال، تتوقف عمليات المرافق والعمليات الحيوية، وإبطاء حركة القطارات، وتحويل إشارات المرور إلى اللون الأحمر على مسارات البنية التحتية الحيوية مثل الجسور، وإغلاق الصمامات في خطوط أنابيب الغاز والنفط في المنشآت الصناعية الخطرة، وتأمين محطات الطاقة.

تتخذ تدابير الحماية الشخصية في المنزل وفي مكان العمل، بما في ذلك الجلوس تحت المكاتب والابتعاد عن المعدات أو المواد الخطرة. تعمل جميع الإجراءات المذكورة بعد نظام الإنذار المبكر للزلازل على تقليل الخسائر الناتجة عن تلف (التعرض Exposure) للأنظمة الهندسية ولكنها لا تمنع مثل هذا الضرر (قابلية الإصابة Vulnerability).

ومع ذلك، أصبح نظام الإنذار المبكر للزلازل قادرًا حاليًا على توفير التنبؤ بحركة الأرض أو الطلب الزلزالي على الهياكل الناجمة عن زلزال كبير، من بضع ثوانٍ إلى بضع عشرات من الثواني قبل وصول هزة أرضية قوية، بطريقة احتمالية كاملة.

ولذلك فإن السؤال المطروح حاليًا هو كيف يمكن استخدام معلومات الإنذار المبكر هذه لاتخاذ إجراءات في الوقت الحقيقي للحد من الضعف في ضوء إدارة المخاطر الزلزالية في الوقت الحقيقي والتخفيف الفعال من الأضرار.

ناقشت العديد من الدراسات، كتطبيق هندسي لنظام الإنذار المبكر للزلازل، التحكم شبه النشط في الهياكل بحيث يمكن للمبنى تغيير خصائصه الديناميكية في غضون ثوانٍ قليلة ليتحمل بشكل أفضل ميزات الحركة الأرضية المتوقعة.





جهاز التحكم شبه النشط هو نظام سلبي له خصائص يمكن التحكم فيها والتي قد تغير الخصائص الديناميكية للهياكل التي يجري تطبيقها عليها. على سبيل المثال، تستخدم المخمدات الريولوجية المغناطيسية **Magneto-rheological Dampers** سوائل تحوي على جزيئات حديدية صغيرة القدر، والتي إذا طبق مجال مغناطيسي عليها، فإنها تشكل سلاسل تزيد من اللزوجة.

يمكن تنظيم شدة المجال المغناطيسي لضبط اللزوجة؛ هذا قد يغير التخميد الهيكلي. تعتمد كيفية تغيير التخميد في استراتيجيات التحكم شبه النشطة على أطراف الاستجابة التي تعكس الخطر في الموقع.

بعد ذلك، مع أن تطوير نظام الإنذار المبكر للزلازل لمثل هذه التطبيقات سيتطلب بنية تحتية مخصصة وموثوقة يمكنها الاستفادة من المعلومات والعمل بسرعة كبيرة وبشكل تلقائي، إلا أن التكامل مع نظام الإنذار المبكر للزلازل في ضوء التحكم الهيكلي في الوقت الفعلي يبدو حالياً ممكناً نظراً لأنه من الممكن الحصول على المتوقع، أو التوزيع الاحتمالي الكامل، للإحداثيات الطيفية في الوقت الحقيقي. ومن ناحية أخرى، يبدو من الصعب دمج نظام الإنذار المبكر للزلازل مع استراتيجيات التحكم النشطة التي تتطلب التنبؤ الكامل لشكل الموجة حتى تعمل.

يجري استخدام مراقبة الصحة الهيكلية لتمثيل تطور الظروف الهيكلية أثناء فترة الخدمة. على النقيض من ذلك، تستخدم منهجيات هندسة الزلازل القائمة على الأداء معلومات الاستجابة الهيكلية لتقدير الخسائر المحتملة المتعلقة بالأداء الزلزالي.





يبدو من السهل تماماً الجمع بين هذه الإمكانيات لتقدير الأداء الاحتمالي للمبنى المجهز تلقائياً في الوقت الفعلي تقريباً بعد تعرضه للحركة القوية.

قد يؤدي تطبيق نظام الإنذار المبكر للزلازل إلى تعزيز إمكانيات النظام في ضوء الاستجابة السريعة للأحداث الكارثية. وفي الواقع، في حالة الأنظمة الحيوية، التي يجب أن تكون قابلة للتشغيل لأغراض إدارة الطوارئ مثل المستشفيات ومحطات الإطفاء أو حتى شرايين الحياة الأساسية في المدن، قد يوفر التقييم السريع للأضرار صورة مفيدة عن حالة هذه الموارد المهمة المتاحة أثناء الطوارئ.

أخيراً، هناك تطور محتمل آخر لتطبيقات نظام الإنذار المبكر للزلازل في الوقت الفعلي تقريباً لتنفيذ نظام الاستجابة السريعة وهو تطور خرائط الهزات إلى خرائط الأضرار.

يمكن إجراء الأبحاث حول وظائف الهشاشة لفئات المباني، وهي توزيعات احتمالية للأضرار الهيكلية المشروطة بمقياس الشدة الزلزالية (التسارع الطيفي على سبيل المثال) الذي يجري استرجاعه على أساس تحليلي أو تجريبي.

بعد ذلك، إذا كان التوزيع المكاني لجرد أي فئة من المباني متاحاً، فمن الممكن استرجاع الأضرار الهيكلية في خرائط في الوقت الفعلي تقريباً، وهو ما يكون أكثر إفادة لإدارة الطوارئ بدلاً من توزيع مستوى الاهتزاز.

وينطبق هذا بشكل خاص على تلك البلدان التي يكون فيها مخزون المباني غير متجانس جداً وقد تكون الهياكل في المنطقة نفسها عبارة عن إنشاءات





حجرية قديمة وإطارات خرسانية مسلحة سواء كانت مصممة زلزالياً أو مُصممة مسبقاً أو مسبقة الصب وحتى هياكل فولاذية.

يحدث هذا، على سبيل المثال، في أوروبا ودول البحر الأبيض المتوسط، حيث لا تعد الخرائط المهتزة أفضل وكيل للضرر نظراً لأن الفئات المدرجة حساسة بشكل مختلف تماماً لمستوى الحركة الأرضية.

• ما وراء الإنذارات الكاذبة: نهج تقدير الخسارة للإنذار المبكر

في نظام الإنذار المبكر للزلازل المختلط، لا يعد وقت التحذير هو المعلمة الوحيدة التي يجب تحسينها: فتقدير ميزات الحدث من خلال علم الزلازل في الوقت الحقيقي هو عملية تعتمد على العلاقات التجريبية وتحمل قدراً كبيراً من عدم اليقين.

علاوة على ذلك، فإن التنبؤ بالحركة الأرضية، والاستجابة الهيكلية، وعلاقات الضرر والخسارة تزيد من عدم اليقين في التنبؤ في الموقع. قد يؤدي عدم اليقين إلى أخطاء في اتخاذ القرارات التنبؤية.

التنبؤ أو عدم التنبؤ كلاهما له تكلفة: ففي حالة عدم التنبؤ ترتبط الخسارة بزلزال يضرب دون اتخاذ أي إجراء مضاد؛ وفي حالة التنبؤ، فإن تدخلات الاستعداد لها تكلفة (اجتماعية و/أو اقتصادية) قد تتحول إلى خسارة إذا كانت الحركة الأرضية الفعلية لا تتطلب مثل هذا الإجراء.



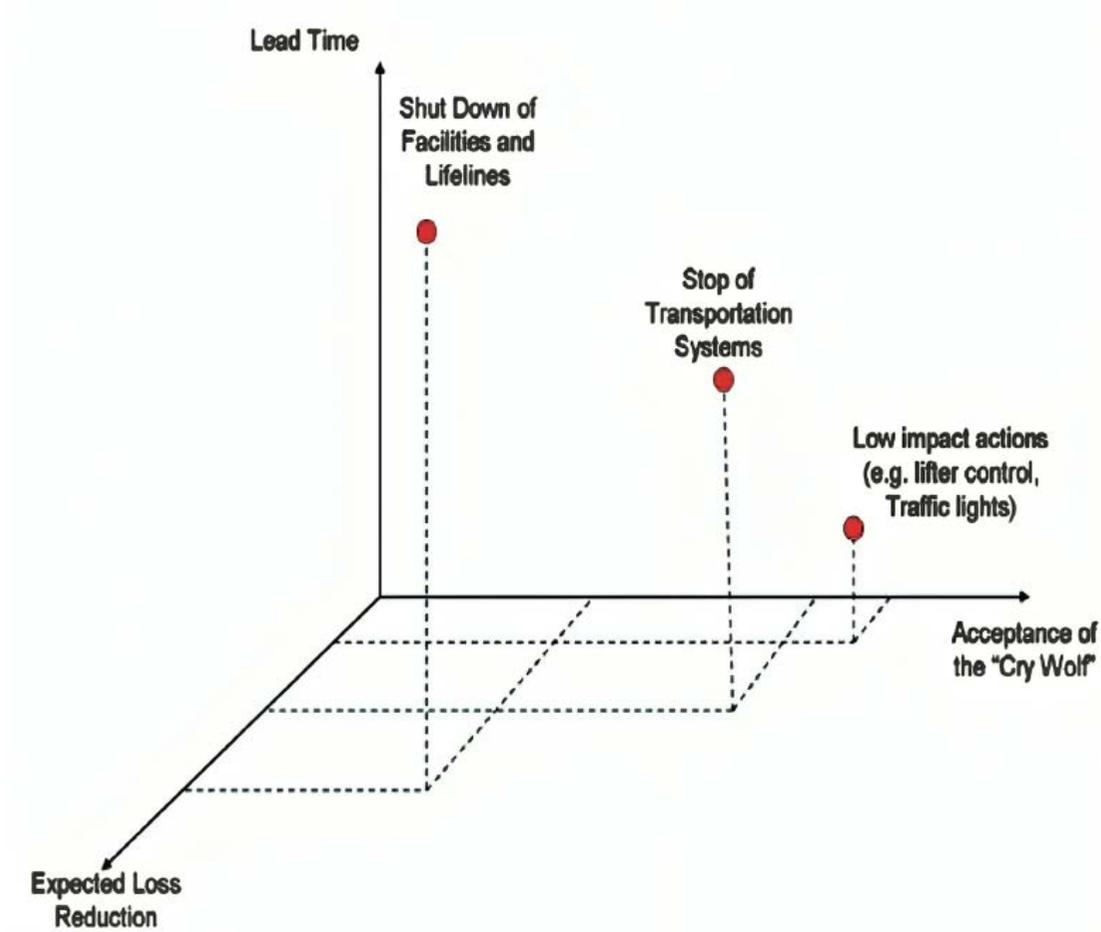


وكما ناقش **جولتز (2002)**، تعتبر الإنذارات الكاذبة مهمة لتبیهات المجتمع لأنها يمكن أن تؤدي إلى تقليل المصدقية («الذئب الصارخ» **Cry Wolf**) مع المسؤولية القانونية.

في عملية اتخاذ القرار الآلي للتطبيقات الهندسية، يجب عدم اتخاذ تدابير مكلفة للحد من المخاطر إذا لم تكن هناك حاجة إليها بشدة. على سبيل المثال، قد يكون توقف شرايين الحياة مكلفاً ويجب أن يكون محدوداً. يجب أن نأخذ في الاعتبار أن الإجراءات في الوقت الفعلي التي تتميز بإمكانية أكبر لتخفيف المخاطر غالباً ما تتطلب أيضاً وقتاً أطول للتحذير.

كما أن ظاهرة «صرخة الذئب» ليس لها الأهمية نفسها بالنسبة لكل فئة من فئات التدخل: حيث يعتمد تأثيرها على مدى تأثير الأنظمة على الإنذار، وعلى تكلفة التوقف (كما في الشكل الآتي).





تأثير الإنذارات الفائتة/الكاذبة لفضات تطبيقات نظام الإنذار المبكر للزلازل.

تحوي أي قاعدة قرارية وعتبة إنذار على احتمالات إنذار كاذبة ومفقودة والتي تشكل مقايضة. وفي الواقع، فإن الحد من الإنذارات الكاذبة من خلال اعتماد عتبات تحذيرية عالية أمر خطير لأنه من شأنه أن يزيد بشكل جوهري





من فرصة عدم إنذار. ولا يمكن تعديل معدلات الخطأ هذه بشكل فعال إلا من خلال تحسين طريقة تقدير المعالم التي يستند إليها القرار (التسارع، على سبيل المثال).

علاوة على ذلك، فإن معدلات الإنذارات الكاذبة والفائتة تتغير أيضاً مع مرور الوقت، ومن ثم قد يتم اتخاذ قرار إصدار الإنذار مسبقاً مع بعض احتمالية حدوث أخطاء قد تتغير في حالة توفر المزيد من البيانات.

وهذه مقايضة حاسمة أخرى في تصميم تطبيقات الإنذار المبكر بالزلازل لأن عدم اليقين يتضاءل فقط عندما يجري جمع المزيد من المعلومات بواسطة الأجهزة الزلزالية، وبعد ذلك فقط عندما تقلل المهلة المتاحة.

يعد تقدير احتمالات الإنذارات الخاطئة والفائتة المرتبطة بعبء الإنذار إحدى الطرائق لفهم الآثار المترتبة على القرار بناءً على تلك العبء.

يجب أن يتكون الحساب على أساس تجريبي من تحليل ما بعد الحدث لتنبؤات نظام الإنذار المبكر للزلازل وسيطلب قاعدة بيانات كبيرة لأشكال الموجات القوية الحركة لكل من الشبكة والموقع الذي يقع فيه الهيكل.

وبما أن قواعد البيانات هذه نادرة جداً، خاصة بالنسبة للزلازل الكبيرة، فيمكن تقريب الأخطاء من النوع الأول والثاني في إطار محاكاة باستخدام التوصيف المناسب لأوجه عدم اليقين التي ينطوي عليها التنبؤ.

يعد تقدير معدلات الإنذارات الكاذبة والفائتة هو النهج الأول لاختبار أداء نظام الإنذار المبكر المختلط. قد تعتمد الطريقة الأكثر تطوراً لمعايرة تصميم نظام الإنذار المبكر للزلازل لاتخاذ القرار الآلي على تقليل الخسائر المتوقعة.





لنفترض أن هناك إجراءين ممكنين، بناءً على البيانات الواردة من أجهزة قياس الزلازل: (1) إنذار؛ (2) لا إنذار. ضع في اعتبارك أنه ينبغي اتخاذ قرار التنبه إذا تجاوزت إحصائية التدابير (متغير القرار) التي اتخذتها الشبكة عتبة معينة.

لتحديد العتبة التي ينبغي تحديدها، يجب حساب الخسائر المتوقعة بعد الإجراء (1) أو (2) بشكل مشروط على أي قيمة لمتغير القرار. يشير القرار المرتبط بالتكلفة المتوقعة الأقل إلى الإجراء الذي يجب اتخاذه من أجل قيمة متغير القرار. يؤدي هذا النهج أيضاً إلى تعريف قيمة العتبة.

على سبيل المثال، في حالة المنهجية التي اقترحها الباحثان ألين وكاناموري (2003) يمكن ضبط عتبة الإنذار عند الفترة السائدة للثواني القليلة الأولى من موجات P () لأن هذه المعلمة مرتبطة بقدر الحدث، بالإضافة إلى تقدير موقع المصدر، يمكن استخدامه للتنبؤ بالحركة الأرضية أو الأداء الهيكلي أو الخسائر الاقتصادية للنظام المعني.

مع الأخذ في الاعتبار عدم وجود إجراءات لتخفيف المخاطر، فمن الممكن حساب القيمة المتوقعة للخسائر في حالة عدم إصدار الإنذار. وبالمثل، في حالة اتخاذ إجراء وقائي، يمكن حساب الخسائر المتوقعة في حالة إصدار الإنذار. إن تقدير هاتين الخسارتين مشروطاً بأي قيمة محتملة لـ () سيؤدي إلى تقسيم مساحة () إلى منطقتين:

1. المنطقة التي تكون فيها الخسائر المتوقعة في حالة عدم وجود إنذار أقل من الخسائر المتوقعة في حالة اتخاذ أي إجراء مأخوذ.





2. المنطقة التي من المتوقع أن تكون فيها الخسائر في حالة إصدار الإنذار أقل مما لو لم يصدر إنذار.

القيمة المحددة لـ () التي تفصل بين هاتين المنطقتين هي العتبة الأمثل لتعيينها. يتغلب هذا الأسلوب على أساليب الإنذار الكاذب والفائت لتحديد عتبة الإنذار نظراً لأن القرار دائماً ما يقلل من الخسارة المتوقعة.

• الآفاق المستقبلية لهندسة الإنذار المبكر بالزلازل

قد يكون نظام الإنذار المبكر للزلازل إقليمياً أو خاصاً بالموقع. حالياً، يمكن لطريقة التحذير الإقليمية التي تستخدم شبكة من المحطات أن توفر معلومات أكثر تفصيلاً ولكن أقل سرعة حول الحركة الأرضية.

وفي المقابل، توفر الطريقة في الموقع تحذيراً أكثر سرعة، لكن المعلومات الواردة من التحذير في الموقع تقتصر على معالم بسيطة نسبياً. قد يؤدي الاستخدام المختلط للتحذير الإقليمي والموقعي إلى تعزيز فائدة وموثوقية نظام الإنذار المبكر للزلازل.

قد يساعد علم الزلازل في الوقت الحقيقي في التغلب على بعض القيود المفروضة على نظام الإنذار المبكر للزلازل الذي جرى تطويره أو تنفيذه حتى الوقت الحالي والذي لا يقدم سوى تحذيرات تتعلق بخطورة الزلازل الوشيكة.

حالياً يمكن تقديم المعلومات المتعلقة بخصائص الحركة الأرضية، على الأقل في طيف الاستجابة، من الثواني القليلة الأولى من الحدث.





يتيح تكامل علم الزلازل في الوقت الفعلي مع هندسة الزلازل القائمة على الأداء لنظام الإنذار المبكر للزلازل أن يكون قادراً على توفير تنبؤات في الوقت الفعلي لتلك المعلومات المفيدة لتصميم التطبيقات الهندسية مع تقدير كمي لعدم اليقين المرتبط كدالة للوقت.

مشاريع نظام الإنذار المبكر للزلازل الحالية في جميع أنحاء العالم هي في المقام الأول من النوع الإقليمي، لأنها تعتمد على تطوير شبكات الزلازل الوطنية أو الإقليمية. ومن هنا نشأت مسألة استخدام نظام الإنذار المبكر للزلازل في التطبيقات الهندسية. وفي الواقع، تعمل العديد من البلدان على تطوير شبكات زلزالية إقليمية تهدف إلى الحصول على قدرات علم الزلازل في الوقت الفعلي. على سبيل المثال، لدى اليابان وتركيا ورومانيا واليونان والولايات المتحدة (كاليفورنيا) وإيطاليا العديد من مشاريع الإنذار المبكر بالزلازل (انظر أيضاً www.seismolab.caltech.edu/early.html).

ومع ذلك، فإن القليل منها على استعداد لتنفيذ نظام نموذجي لهندسة الزلازل في الوقت الفعلي، مع أن جميع المشاريع حددت ذلك كهدف رئيسي. تميل جميع المشاريع ونظام الإنذار المبكر للزلازل الحالي إلى تقليل التعرض للأنظمة الحيوية. ومع ذلك، يبدو أن التطور الطبيعي لنظام الإنذار المبكر للزلازل هو تقليل الأضرار، أي التخفيف من مخاطر الزلازل عن طريق تقليل قابلية الإصابة الهيكلية.

يبدو الأمر ممكناً مع تطبيق علم الزلازل في الوقت الفعلي كمدخل للتحكم الهيكلية شبه النشط. لتحقيق هذا الهدف، يلزم التفاعل بين علم الزلازل الهندسي في الوقت الفعلي وهندسة الزلازل في الوقت الفعلي لتطوير مبادئ توجيهية للتصميم لتطبيقات نظام الإنذار المبكر للزلازل الهندسية.





هذا هو المستقبل المنظور لنظام الإنذار المبكر للزلازل. إنه يعتمد ما إذا كان هذا النوع من التطبيق ممكناً على المهلة الزمنية المقدمة ولكن أيضاً على معدل فشل التنبؤ. هناك نقاش مستفيض في أنظمة الإنذار المبكر حول كيفية تحديد عتبة الإنذار. في العديد من أنظمة الإنذار المبكر بالزلازل، التي تكون عادةً خاصة بالموقع ولكنها أيضاً إقليمية، في بعض الحالات، تتعين هذه العتبة على مستوى الحركة الأرضية، أي التسارع المسجل بواسطة الشبكة الزلزالية. وبشكل عام، يجب تعيين العتبة على المعلمة التي تسجلها محطات رصد الزلازل كبديل لميزات الحدث. مع أنه يمكن حالياً تقدير معدلات الإنذارات الكاذبة/الفائتة، إلا أن معايرة نظام الإنذار المبكر الزلزالي وإعداد عتبة الإنذار ينبغي أن تجري في نهج تقدير الخسارة، أي أن الإجراء الذي يتعين اتخاذه للحد من المخاطر هو الذي يقلل من مخاطر الخسائر المتوقعة.

ومن بين متطلباته، يجب أن يكون لدى نظام الإنذار المبكر للزلازل للتطبيقات الهندسية في الوقت الفعلي شبكة قادرة على قياس معالم الاستخدام للزلازل في الوقت الفعلي، وقدرات المعالجة السريعة وبنية تحتية مخصصة موثوقة ومتكررة للإرسال.

في حالة تقليل نقاط الضعف في الوقت الفعلي، كما هو الحال بالنسبة للتحكم الهيكلي شبه النشط، يجب أيضاً تزويد نظام الحماية بنظام تلقائي قادر على تشغيل الأجهزة أو بدء أي إجراء أمني آخر في حالة حدوث إنذار. من المرجح أن تتطلب هذه الأنواع من التطبيقات تطوير تقنيات جديدة خاصة بهندسة الزلازل في الوقت الفعلي، والتي قد تكون مشكلة حاسمة لتطوير نظام الإنذار المبكر للزلازل الهجين.





تحذيرات الزلازل للهيئات الحكومية والأفراد

يمكن إصدار التحذيرات من الزلازل الوشيكة على فترات زمنية مختلفة ولأغراض مختلفة. في بعض الحالات، قد يؤدي التحذير إلى مراقبة أفضل لمنطقة معينة. وفي حالات أخرى، قد يؤدي التحذير إلى إنقاذ الأشخاص من المنازل التي قد تكون عرضة للخطر المتوقع.

في البلدان التي تكون فيها الزلازل المدمرة هي القاعدة، يجب أن يكون هناك تواصل تفاعلي مستمر بين علماء الجيولوجيا والهيئات الحكومية فيما يتعلق بالمراقبة والتنبؤ واختيار الخطوات الأكثر ملاءمة التي يجب اتخاذها للتخفيف من المخاطر.

قد تتضمن التحذيرات تقييم آثار زلزال مدمر في منطقة معينة، وقد يتضمن التحذير من الزلازل تقييم الصدع الذي من المرجح أن يتمزق بعد ذلك داخل المنطقة الزلزالية. قد تعتمد التحذيرات على الوقت (أي الإشارة على المدى القصير أو الطويل إلى اقتراب وقوع زلزال).

جرى إنشاء أنظمة إنذار مهمة للتحذير من آثار الزلازل الكبيرة في العديد من البلدان. الهدف هو المساعدة في أعمال الإنقاذ والتخفيف من الآثار المدمرة للزلازل على الناس والبنية التحتية المجتمعية، حتى لو لم يكن من الممكن إعطاء تحذير قبل حدوثها. في جميع أنحاء العالم، توجد حالياً أنظمة تحذر مما يسمى «الأحداث المزدوجة» **Coupled Events** (مثل موجات التسونامي الناجمة عن الزلازل).





تتضمن التحذيرات الصادرة عن المجتمع العلمي تقديم نصيحة واضحة للهيئات الحكومية حول إجراءات تخفيف المخاطر التي يجب اتخاذها. ويمكن أن تكون هذه الإجراءات أي شيء بدءاً من زيادة المراقبة والتقييم العلمي المعزز وحتى الإنقاذ في حالة وقوع زلزال مدمر وشيك على المدى القصير.

في أيسلندا، تمر التحذيرات الموجهة إلى الجمهور والهيئات الحكومية عبر الوكالة الوطنية للحماية المدنية (NCPA) التي تتخذ الخطوات اللازمة، بناءً على المعلومات والنصائح المقدمة من العلماء (مثل تقديم المشورة للناس بشأن الاحتياطات الواجب اتخاذها). لا تصدر تنبؤات بحدوث زلزال أبداً دون تقديم المشورة بشأن ما يجب فعله وكيفية الاستعداد بشكل أفضل له.

وفي ضوء المخاطر البركانية والزلازل المتكررة في أيسلندا، تم تطوير إجراءات التواصل التفاعلي بين علماء الأرض والهيئات الحكومية بشكل تدريجي.

يجري التواصل عبر الهاتف والبريد الإلكتروني وإذا كان هناك وقت عن طريق الاجتماعات. بمبادرة من العلماء أو NCPA، يمكن استدعاء مجلس استشاري لتقييم ومناقشة البيانات المتعلقة باحتمال وقوع زلزال والإجراءات التي يتعين اتخاذها. تضم هذه الاجتماعات علماء من عدة مؤسسات وممثلين عن الحكومة (معظمهم من موظفي NCPA).

عندما يرى العلماء أن هناك حدثاً ما وشيكاً، فإنهم يبلغون ذلك إلى NCPA أو مباشرة إلى مجموعات الحماية المدنية المحلية، المرتبطة بالـ NCPA وعادةً ما ترتبط أيضاً بالمجالس المحلية.





سنقدم هنا وصفاً للحدث الوشيك المحتمل ونصائح حول كيفية الاستعداد له. تقوم الحماية المدنية بعد ذلك باتخاذ الإجراءات التحضيرية ذات الصلة وإبلاغ الجمهور عندما يرون التهديد حقيقياً وتقديم المشورة بشأن كيفية الاستعداد للحدث المحتمل الوشيك.

• سيناريوهات التحذير من الزلازل والمخاطر الجيولوجية الأخرى

يجب أن تستند التحذيرات من الزلازل إلى مراقبة مستمرة ومنظمة بشكل جيد لما يحدث في القشرة الأرضية. وينطبق الشيء نفسه على التحذيرات من الانفجارات البركانية والأحداث المقترنة مثل التسونامي والانهيارات الأرضية والانهيارات الثلجية. ومن الضروري الرصد المستمر لأنواع كثيرة من الأرصاد الجيوفيزيائية.

قد تأتي معلومات مهمة من العديد من أنواع الأرصاد الأخرى أيضاً، مثل الملاحظات والتقارير الواردة من الجمهور. يجب أن يتم التقييم والمقارنة بين الملاحظات المختلفة بأسرع ما يمكن من الناحية الفنية.

تتضمن المراقبة الفعالة للمخاطر الجيولوجية أيضاً إجراء بحث حول ما تعنيه الأرصاد. يعتمد هذا، من ناحية، على نتائج أبحاث سابقة، ومن ناحية أخرى، على الأبحاث المستمرة نتيجة للملاحظة المكثفة، أو «البحث في الوقت الفعلي» كما يطلق عليه أحياناً. ويجب أن تكون نتائج هذا النشاط البحثي متاحة للعلماء الذين يراقبون النشاط حتى يتمكنوا من تطبيقها في الوقت المناسب لمواجهة الخطر المتوقع.





وتحتاج المراقبة الفعالة إلى دعمها بنظام تلقائي ويدوي حتى يمكن دمج البيانات بسرعة، ولوضع النماذج والمقارنة مع الملاحظات السابقة.

الهدف من هذا النظام هو الكشف تلقائياً ودمج الأنماط (أو الإشارات) المختلفة التي عثر عليها مسبقاً قبل الزلازل الكبيرة. ولا يقل أهمية عن ذلك عمل العلماء في تفسير هذه التغييرات والبحث عن أنماط غير عادية في البيانات، وهي أنماط لم نشهدها من قبل، والتي قد تكون مهمة لفهم العمليات القشرية الجارية. يتمثل جزء كبير من المراقبة في جمع نتائج الأبحاث الجديدة في قاعدة بيانات، حيث يمكن لمجموعة العلماء المشاركين متعددي التخصصات الوصول إليها بسهولة.

سنناقش حالياً نظام المراقبة قيد التطوير والذي يتمثل هدفه الرئيسي في تقديم تحذيرات من الزلازل الوشيكة. تتشابه أنظمة مراقبة المخاطر الجيولوجية الأخرى من نواحٍ عديدة.

تتمثل المهمة الأولى لإجراءات مراقبة الزلازل في اكتشاف المكان الذي يحتمل فيه حدوث زلزال كبير، وتقدير مدى سرعة حدوثه، وما هي التأثيرات (الكثافات والتسارعات) التي يمكن توقعها بشكل عام.

تتغير هذه التقديرات مع مرور الوقت، مع تطور فهمنا للمنطقة المحورية والزلازل المعني. يعتمد هذا على افتراض أننا نتعلم أكثر عن الزلازل الوشيكة والعمليات التحضيرية لها من خلال مراقبة وتفسير الأرصاد المهمة من المنطقة التي بدأت فيها العمليات التحضيرية للزلزال.





يفترض الباحثون أنه قبل وقت قصير من حدوث الزلزال يمكننا التنبؤ بالمكان والتأثيرات المتوقعة بشكل أفضل بكثير مما يمكننا القيام به قبل وقت طويل من حدوثه. بعد وقوع الزلزال، تتمثل مهمة المراقبة الأخرى في التنبؤ بآثار الزلزال (أي التنبؤ بالعواقب ومنطقة الدمار بشكل أفضل مما كان بإمكاننا القيام به قبل وقوعه) ومن ثم توفير جميع المعلومات الناشئة لفرق الحماية المدنية والإنقاذ بأفضل طريقة ممكنة.

إن الهدف أيضاً من المراقبة هو محاولة التنبؤ بالمواقع والتأثيرات المحتملة للزلازل والمخاطر الجيولوجية الأخرى التي قد تنشأ عن حدث أول (أي الأحداث المقترنة).

لقد عثر على طرائق جديدة لمساعدتنا في اكتشاف التغيرات المهمة التي تبنى بحدوث الزلازل الكبيرة.

سيكون من الخطأ الادعاء بأننا نستطيع التنبؤ بكل الزلازل. ومع ذلك، فمن خلال معرفتنا الحالية وتقنيات المراقبة، من الواقعي أن نكتشف في مرحلة مبكرة عملية مستمرة قد تتطور إلى زلزال. ربما سنكون قادرين على إصدار نوع من التحذير قبل كل الزلازل.

مع الأخذ في الاعتبار فهمنا الحالي وقدرات المراقبة، تكون التحذيرات من الزلازل ممكنة في ظل السيناريوهات الآتية:





1. إصدار تحذير قبل سنوات إلى أشهر حول الموقع، والقوة التدميرية، والمنطقة المتضررة بشكل عام من زلزال وشيك.

مثل هذا التحذير من شأنه أن يسمح للعلماء ومجموعة الحماية المدنية المحلية باتخاذ خطوات طويلة المدى للتخفيف من المخاطر. وسيكون لديهم الوقت لتجميع الأرصاد الأساسية وزيادة عدد الملاحظات العامة. ويمكن إجراء تحليل البيانات ونمذجة مخاطر الأرض، والجهود المبذولة لتعزيز البنية التحتية، واستعداد مجموعة الحماية المدنية المحلية في المنطقة دون ضغوط لا داعي لها.

2. إصدار تحذير قبل أسابيع إلى أيام

تستعد مجموعات الحماية المدنية والإنقاذ المحلية. وتبذل الجهود لرفع استعداد الناس. زيادة عمليات المراقبة القائمة على أجهزة الاستشعار وزيادة المراقبة العلمية في الوقت الحقيقي.

3. إصدار تحذير قبل أيام أو ساعات أو دقائق من وقوع زلزال وشيك

يجري إطلاق استعدادات مجموعة الحماية المدنية المحلية لحدث ما على الفور. يتواصل العلماء ومجموعة الحماية المدنية المحلية بشكل مستمر لتقديم أفضل النصائح الممكنة بشأن الإجراءات التي يجب اتخاذها عند وقوع الزلزال والمخاطر المرتبطة به. كما يشاركون في إعلان انتهاء فترة التحذير إذا لم يعد احتمال وجود خطر وشيك يمثل تهديداً. مثل هذا التحذير مثل طريقة التحذير الأولي لن يجر تقديمه للجمهور إلا من قبل منظمات الحماية المدنية.





4. عند حدوث الزلزال

تتخذ الإجراءات للتخفيف من التأثير على الأشخاص والبنية التحتية المجتمعية من خلال تقييم الأضرار في الوقت الفعلي وتقديم المشورة العامة حول أفضل طريقة ممكنة للحد من هذا التأثير. تحذيرات من الأحداث المترافقة المحتملة وتقدير تأثيرها.

5. معلومات ما بعد الزلزال

شرح ما حدث للجمهور والجهات الحكومية. تقييم وتحذير للأحداث المقترنة المحتملة.

إن الأرصاد والتحذيرات التي تسبق الانفجارات البركانية وفيضانات المياه الجليدية يمكن مقارنتها في كثير من النواحي بسيناريوهات التحذير من الزلازل. وفي كثير من الحالات تستخدم أجهزة الاستشعار نفسها، كما هو الحال بالنسبة لأنظمة الاتصال والتقييم.





• أنظمة المراقبة الجغرافية المستخدمة أو تحت التطوير

- تستند التنبؤات والتحذيرات المفيدة بشأن مخاطر الزلازل والبراكين إلى:
 - ❖ المراقبة طويلة المدى والتقييم العلمي والنمذجة لإيجاد وفهم عملية القشرة السببية في كل موقع.
 - ❖ إنشاء قواعد تأسيسية لاستقراء العملية لبعض الأحداث المستقبلية.
 - ❖ تصور تعدد المخاطر المحتملة التي يمكن أن تتجم عن الخطر الوشيك.
- ولهذا الغرض، هناك حاجة إلى نظام فعال لمراقبة الأرض، يعتمد على الرصد في الوقت الحقيقي والتقييم العلمي، حيث تكمل تكنولوجيا الحاسوب والمعلومات الحديثة وتدعم المدخلات العلمية.

• اعتماد سياسة طويلة المدى لمراقبة مخاطر الأرض

- كما ناقشنا سابقاً، يعتمد إجهاد القشرة في أماكن فردية، من ناحية، على إجهاد القشرة على نطاق واسع عن طريق حركة الصفائح القشرية، وربما يتفاعل مع التأثيرات واسعة النطاق لعمود وشاح البلد موضع الاهتمام، ومن ناحية أخرى، على عدم التجانس المحلي الذي يتغير بشدة في الزمان والمكان.
- تعتمد التغيرات في عدم التجانس المحلي بشكل كبير على هجرة السوائل إلى الأعلى: من المتوقع حدوث تصاعد بطيء في المنطقة الزلزالية وتصاعد أسرع في المناطق البركانية.





لا يؤدي التفاعل بين ضغط المائع وانزلاق الصخور إلى عمليات عرضية قصيرة على المستوى المحلي فحسب، بل أيضاً على نطاق واسع، مما يؤثر على خطورة الصدع في مناطق واسعة. قد تؤدي الأحداث القشرية الكبيرة إلى إطلاق عمليات على مسافات قصيرة وطويلة.

يقال إنه «لا يوجد زلزالان متماثلان»، وهذا ينطبق أيضاً على العمليات التحضيرية لهما. ويمكن قول الشيء نفسه عن التمزقات. وقد تستمر العمليات التحضيرية الملحوظة في كلتا الحالتين لعقود من الزمن.

لذلك، فإن المسار الذي يجب أن يتخذه العلم نحو إعطاء تحذيرات في موقع محدد هو أحد التنبؤات الحتمية لتطور العمليات القشرية المستمرة في الأحجام القريبة خلال فترات زمنية قصيرة.

يعتمد هذا على الفهم الناشئ بأن معظم ما تم تعلمه عن نواة زلزال وشيك هو نتيجة للمراقبة التفصيلية للعمليات التحضيرية الجارية والعلاقات الفيزيائية التأسيسية التي جرى إنشاؤها لهذه العمليات. ومع ذلك، يجب تعديلها بشكل مطرد وفقاً للملاحظات المستمرة.

وهذا يضع القواعد لمنهجية مراقبة جيدة التنظيم تتضمن ما يلي:

1. مراقبة واسعة النطاق لديناميكيات القشرة الأرضية، بما في ذلك الديناميكيات واسعة النطاق لعمود الوشاح الأرضي وتفاعله مع حركة الصفائح.
2. البحث الدقيق عن مواقع فردية في الزمان والمكان حيث تلاحظ الضغوط الكبيرة (أو القرب العام من حرجة الكسر) (أي ما يسمى «البقع الحمراء» (Red Spots)).





3. القرارات المتخذة بشأن أفضل طريقة لتركيز جهود المراقبة على النقاط الحمراء.

4. النمذجة الفيزيائية للعمليات الجارية على المستوى المحلي والاقتران المحتمل واسع النطاق بين الأحداث البعيدة (أي الأحداث المقترنة).

5. الإجراءات القائمة على القواعد للتحذيرات طويلة المدى وقصيرة المدى حول المواقع، والمخاطر المتوقعة، والقرب في الوقت المناسب، بما في ذلك من يجب أن يتلقى هذه التحذيرات، وكيف ينبغي تقييمها، والمشورة حول كيفية الرد.

6. إجراءات جيدة التنظيم وجمع البيانات للتحضير لتعدد الأحداث المقترنة وطويلة الأمد التي تعقب الحدث الأولي والتي يجب إعطاء تحذيرات بشأنها. حتى تكون المراقبة فعالة قدر الإمكان، ينبغي تطبيق جميع المعرفة المتاحة عن البنية القشرية في البلاد وأحدث أبحاث التنبؤ بالزلازل.

وينبغي دمج جميع الأرصاد الجيوفيزيائية ذات الصلة وتحليلها لدراسة العمليات الجارية.

منهجية المراقبة هذه، مع أنها تركز بشكل أساسي على التحذيرات من الزلازل، إلا أنها ذات صلة أيضاً بمراقبة الانفجارات البركانية والتحذير منها.

سيكون هناك بالطبع أولئك الذين يحتجون على أن بناء هذا النظام وتشغيله سيكلف الكثير من المال. قيل هذا أيضاً عندما كانت هناك خطط للنظام الزلزالي الأوتوماتيكي SIL قبل أكثر من 20 عاماً.





ولكن حالياً، كما كان الحال آنذاك، فإن تكنولوجيا الحاسوب الحديثة مع سرعة وحدة المعالجة المركزية المتزايدة بسرعة ستساعدنا في الحفاظ على انخفاض تكاليف التشغيل.

ومع ذلك، ينبغي أن يوضع في الاعتبار أن تطوير مثل هذا النظام له أهمية حيوية للتخفيف من مخاطر الأرض في جميع أنحاء العالم، وينبغي أن يكون مهمة مشتركة للعلماء ومجموعات الحماية المدنية في العديد من البلدان، بالطريقة نفسها تقريباً مثل SIL النظام الذي كان ولا يزال.





تقدير الوقت الحقيقي لقوة الزلازل للإنذار المبكر من الزلازل (التجربة الإيطالية)

على مدى العقود القليلة الماضية، كانت هناك تجارب مستمرة لأنظمة الإنذار المبكر من الزلازل (SEW) في العديد من المناطق الزلزالية النشطة في العالم.

أمكن تطوير وتنفيذ أنظمة الإنذار المبكر من الزلازل النموذجية في تايوان واليابان والولايات المتحدة الأمريكية والمكسيك، حيث يجري إرسال إشارات التحذير من شبكات قياس الزلازل الكثيفة في مناطق مصدر الزلازل إلى المستوطنات الحضرية القريبة.

يمكن لأنظمة الإنذار المبكر من الزلازل التي تعتمد على التحليل الآلي في الوقت الفعلي لقياسات الحركة الأرضية أن يكون لها دور في تقليل المرونة الإقليمية من خلال تعزيز العمل لحماية البيئات المبنية وشریان الحياة.

يمكن استخدام المعلومات المبكرة التي توفرها أنظمة الإنذار المبكر من الزلازل عندما لا تزال الموجات الزلزالية تنتشر لتفعيل التدابير الأمنية المختلفة، مثل إغلاق الأنظمة الحيوية، وإيقاف أنظمة النقل، وإغلاق شرايين الحياة في المدن.

اعتماداً على هندسة الشبكة وتكوينها حول المصدر الزلزالي المحتمل و/أو المنطقة المستهدفة، يمكن تصنيف أنظمة الإنذار المبكر من الزلازل وفقاً لكاناموري (2005) إلى:





1. إقليمي. حيث توضع شبكة زلزالية كثيفة منتشرة في منطقة مصدر الزلزال المحتملة.

2. موقعي. أداة واحدة أو مجموعة من الأدوات المنتشرة في الموقع المستهدف، والذي يكون بعيداً عن منطقة مصدر الزلزال.

بالنسبة لأنظمة الإنذار المبكر من الزلازل الإقليمية، تبدأ نافذة التحذير من الزلازل في وقت اكتشاف أول موجة P بواسطة الشبكة المنتشرة في منطقة مصدر الزلزال. يمكن أن تستمر هذه النافذة من بضع ثوانٍ إلى عدة عشرات من الثواني، اعتماداً على المسافة بين المصدر والمنطقة المستهدفة.

بالنسبة لأنظمة الإنذار المبكر من الزلازل في الموقع، يجري تحديد المهلة الزمنية من خلال الفرق بين أول حركة موجة P مسجلة في الموقع المستهدف والوصول اللاحق لسعات الطاقة (المحمولة بواسطة موجات S الأولية أو موجات الجسم الثانوية أو الموجات السطحية)، والذي سيعتمد أيضاً على المسافة من منطقة مركز الزلزال.

في كلتا الحالتين، يجب الحصول على تقديرات آلية بالكامل وقوية وموثوقة في الوقت الفعلي لبارامترات الزلزال الرئيسية (الموقع والقدر) في شكل متطور ومحدث باستمرار، بحيث يمكن استخدامها لأغراض التحذير أو لمحاكاة خرائط الهزات الواقعية. وتكون مفيدة في الاستعدادات لحالات الطوارئ وإدارتها.

يتعرض نحو 6 ملايين نسمة وعدد كبير من المنشآت الصناعية في منطقة كامبانيا Campania التي تحيط بخليجي نابولي وسورينتو بشدة لمخاطر الزلازل



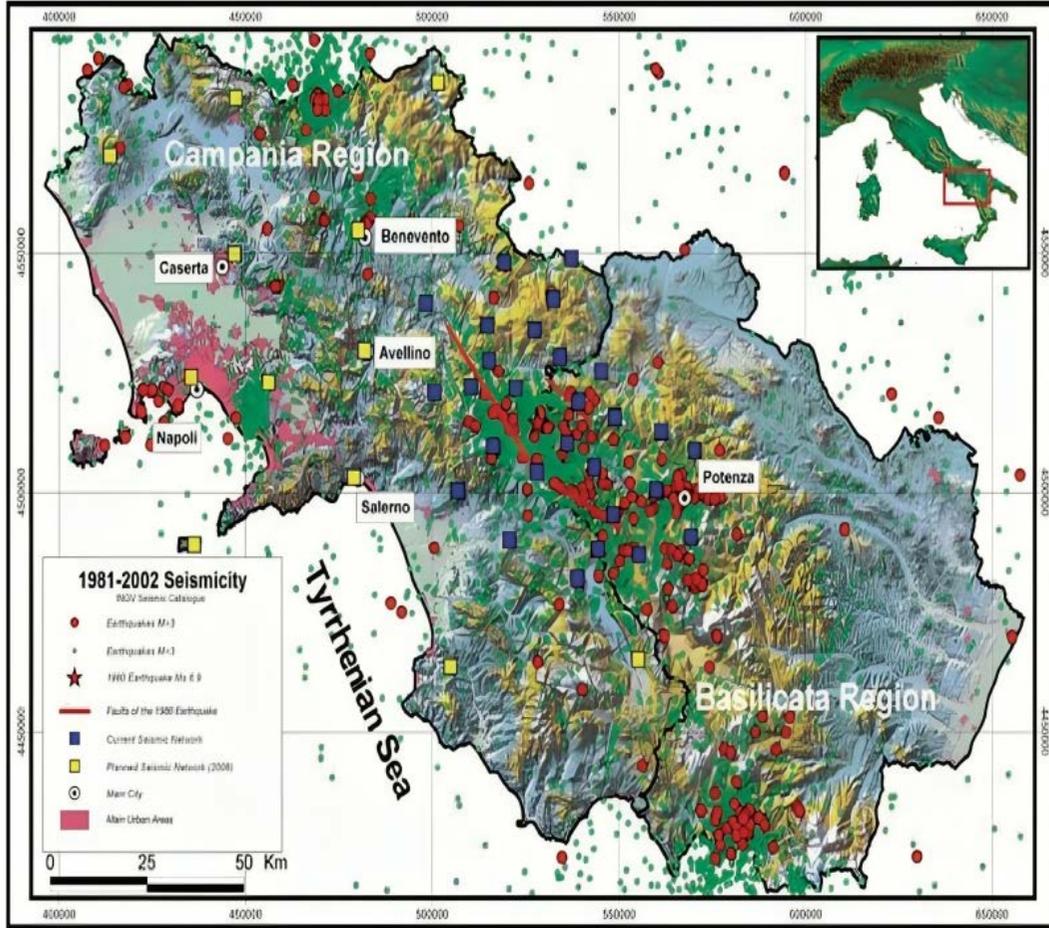


والتي ترتبط بزلزال يتراوح من المتوسط إلى الكبير والذي ينشأ من أنظمة الصدع النشطة في حزام أبينين في إيطاليا.

كان زلزال **إربينيا عام 1980**، بقوة = **6.9**، هو أحدث زلزال مدمر حدث في المنطقة: فقد تسبب في مقتل أكثر من **3000 شخص** وإلحاق أضرار جسيمة واسعة النطاق بالمباني والبنية التحتية في جميع أنحاء المنطقة بكاملها.

وفي إطار مشروع مستمر تموله الإدارة الإقليمية للحماية المدنية، يجري تطوير واختبار نموذج أولي لنظام الإنذار المبكر بالزلازل وتقييم خريطة الهزات السريعة في جنوب إيطاليا. يعتمد ذلك على شبكة زلزالية ديناميكية وكثيفة جداً (مقاييس التسارع + مقاييس الزلازل) التي يجري تركيبها في منطقة حزام أبينين (ISNet) الشكل الآتي.





خريطة لشبكة ISNet والزلازل في منطقة كامبانيا.

يمكن تصنيف هذا النظام على أنه نظام الإنذار المبكر من الزلازل إقليمي لأنه سيتكون من شبكة واسعة من أجهزة استشعار الزلازل التي تغطي جزءاً أو كل المنطقة المعرضة للتهديد من ضربة زلزال.





سيحتاج تطبيق نظام الإنذار المبكر من الزلازل هذا في منطقة كامبانيا والذي سيعتمد على شبكة ISnet إلى الأخذ في الاعتبار التأخير الزمني المتوقع لأول قطار طاقة ذو موجة S والذي سيتراوح بين 14 و20 ثانية على مسافات تتراوح من 40 إلى 60 كم، وبين 26 إلى 30 ثانية على مسافة 80 إلى 100 كم، من زلزال قشري ضحل يحدث في منطقة المصدر.

التأخير الأخير هو النافذة الزمنية النموذجية المتاحة للتخفيف من آثار الزلازل من خلال الإنذار المبكر في مدينة نابولي (التي يبلغ عدد سكانها نحو 2 مليون نسمة، بما في ذلك الضواحي).

بالنظر إلى نافذة التحذير هذه التي ستتراوح من عشرات الثواني قبل وقوع الزلزال إلى مئات الثواني بعد وقوع الزلزال، يمكن اعتبار العديد من البنى التحتية العامة والمباني ذات الأهمية الاستراتيجية (مثل المستشفيات وخطوط أنابيب الغاز والسكك الحديدية) في كامبانيا بمثابة اختبار محتمل، أي مواقع لاختبار التقنيات المبتكرة للحصول على البيانات ومعالجتها ونقلها.

على وجه التحديد، بالنسبة لتقديرات القدر في الوقت الفعلي لأغراض الإنذار المبكر من الزلازل، جرى مؤخراً اقتراح عدد من الطرائق التي تعتمد على التردد/الفترة السائدة و/أو اتساع ذروة الحركة الأرضية المقاسة عبر نافذة زمنية ضيقة (بين 3 و4 ثوانٍ) يمتد من بعد وصول الموجة P الأولى مباشرةً. على وجه الخصوص، جرى التحقق من صحة الطرائق المستندة إلى تقديرات القدر في الوقت الحقيقي من معلمة الفترة السائدة ومعايرتها للتسجيلات الإقليمية لسرعة الحركة الأرضية التي يمكن الحصول عليها بواسطة محطات قياس الزلازل المجهزة بمقاييس الزلازل العمودية قصيرة الفترة.





نظراً للنطاق الديناميكي الكبير والكثافة العالية للشبكة الزلزالية قيد التركيب في المنطقة الزلزالية لمنطقة كامبانيا، نسعى في هذه المقالة إلى دراسة إمكانية قياس الكميات المرصودة المختلفة في الإشارات في الوقت الفعلي التي حصلت عليها هذه الشبكة الزلزالية، بما في ذلك معلمة الفترة السائدة، والتي يمكن استخدامها كمقدرات قدرية وعزمية.

بافتراض حدوث حدث محتمل متوسط إلى كبير يحدث في أعماق القشرة الأرضية الضحلة (**أقل من 20 كم**) أسفل الشبكة الزلزالية، من المتوقع اكتشاف الإشارات من الموجات **P** والموجات **S** الأولى في غضون **1.5** إلى **3.5 ثانية** و**2.6** إلى **6.0 ثانية**. على التوالي، بعد الوقت الأصلي. ستوفر هذه النوافذ الزمنية القصيرة نوعاً ما الفرصة لدمج معلومات الموجة **P** والموجة المبكرة **S** لتحديد موقع الزلازل بسرعة وتقدير قدرها.

وقد قام الباحثون بتحليل قاعدة بيانات الحركة القوية الإيطالية، وهو نوع البيانات الأكثر ارتباطاً بتلك المتوقع أن يجري تسجيلها بواسطة نظام الإنذار المبكر من الزلازل لمنطقة كامبانيا، سواء من الناحية الآلية أو الزلزالية.

استناداً إلى هذه المعلومات الموجودة حول مواقع الأحداث وأحجام اللحظات، قمنا بالتحقق من الارتباطات بين معالم ذروة الحركة القوية ومعالم التردد السائدة كوظائف قدر لزيادة النوافذ الزمنية من أول وصول لموجتي **P** و**S**.

تمثل هذه الدراسة تحليلاً أساسياً لبيانات الحركة القوية والذي من شأنه أن يؤدي إلى معايرة والتحقق من صحة واختبار الخوارزميات التي يمكن استخدامها لتقديرات في الوقت الحقيقي للأحجام من الشبكة الزلزالية لمنطقة كامبانيا.





• قاعدة بيانات الحركة القوية الإيطالية

نظراً للمدى الديناميكي وخصائص الكثافة لشبكة نظام الإنذار المبكر من الزلازل قيد الإنشاء في منطقة كامبانيا، يمكن استخدام معلومات سعة الذروة والفترة السائدة من إشارات الموجة **P** والموجة **S** المبكرة غير المشبعة بشكل مشترك لتقديرات القدر.

بهدف البحث عن الارتباطات بين المعالم والأحجام المرصودة، قام الباحثون بتحليل السجلات المكونة من ثلاثة مكونات من قاعدة بيانات الحركة القوية الأوروبية (**ESD**)، باستخدام الزلازل الصغيرة إلى الكبيرة التي حدثت في إيطاليا على مدى العقود الثلاثة الماضية.

أمكن إنشاء التعليم من أجل التنمية المستدامة كنتيجة لمشروع أوروبي ضمن البرنامج الإطاري الخامس. وهو عبارة عن بنك بيانات يمكن البحث فيه عبر الإنترنت ويغطي الفترة من **عام 1972 إلى عام 1999**. ومن ثم فقد قام بجمع وأرشفة وتوزيع أكثر من **3000** سجل زمني لتسارع الزلازل في أوروبا والمناطق المجاورة.

حالياً يُؤرشف أكثر من **2000** سجل زمني لتسارع في بنك البيانات كسجلات غير مصححة ومصححة، بالإضافة إلى أطيف الاستجابة المرنة المقابلة لها. تتوفر أيضاً معالم المصدر الرئيسية (الموقع، وقدر اللحظة) لكل زلزال مسجل في قاعدة البيانات بعد التحقق من صحتها، وإذا لزم الأمر، إعادة حساب أو إعادة تقدير معالمها الزلزالية والأدواتية والخاصة بالموقع.





تمثل سجلات الحركة القوية للزلازل الإيطالية التي وقعت بين عامي 1976 و1998 جزءاً كبيراً من بنك البيانات، وأمكن الحصول عليها في معظمها من خلال شبكة الحركة القوية ENEL-ENEA التي تتكون من 300 محطة تسارع مثبتة في جميع أنحاء إيطاليا.

تشغل هذه الشبكة حالياً من قبل إدارة الحماية المدنية الإيطالية (DPC) من خلال الخدمة الوطنية لرصد الزلازل (SSN). توجد أيضاً بيانات من الشبكات المحلية والإقليمية الإيطالية الأخرى في بنك البيانات.

جرى الحصول على معظم سجلات الحركة القوية للزلازل الإيطالية الماضية باستخدام أجهزة قياس التسارع التناظرية Kinematics SMA-1. وهي عبارة عن أدوات تعتمد على العتبة تسجل حركة الأرض إما على شكل أثر فوتوغرافي على فيلم أو ورق، أو أثر خدش على ورق مشمع.

عادة ما تُضبط مستويات العتبة على 0.005 إلى 0.010 من تسارع الجاذبية الأرضية في الاتجاه الرأسي، ومن ثم في كثير من الأحيان لا تسجل إشارة الزلزال بكاملها، بل جزءاً من الإشارة التي تبدأ بعد أول قطار موجات P قادر على إطلاق إشارة قوية. تسجيل الحركة للظروف المثلى لمسافة الحدث وقدره.

تتضمن معالجة بيانات SMA-1 الموجودة في ESD الرقمنة وتصحيح الحساسية وتصحيح خط الأساس الخطي والترشيح في نطاق التردد من 0.25 إلى 25 هرتز باستخدام مرشح تمرير النطاق الإهليلجي من الدرجة الثامنة.

بعد الفحص البصري لعينات من سجلات الإزاحة والسرعة التي يمكن الحصول عليها عن طريق التكامل المزدوج والفردي لسلاسل زمنية التسارع،





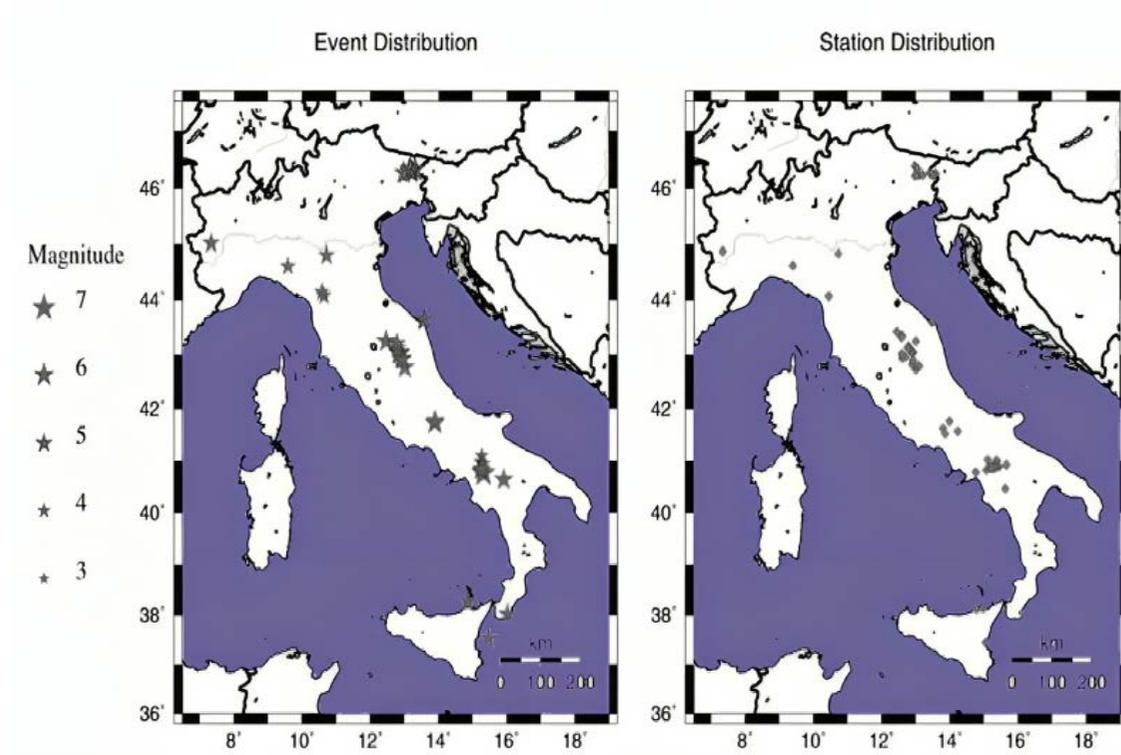
قرر الباحثون تطبيق مرشح بترورث الإضا في ذو التمرير العالي، ثنائي القطب، ذو إزاحة صفرية الطور بتردد زاوية قدره 0.075 هرتز، لتوفير خط أساس أكثر ملاءمة وتصحيح الاتجاه على المدى الطويل.

من أجل التحقيق في الارتباطات بين التقديرات في الوقت الحقيقي لكميات وأحجام الحركة القوية، اختار الباحثون 116 سجلاً للحركة القوية ثلاثية المكونات للزلازل الإيطالية التي حدثت في الفترة من 1976 إلى 1998 بمقادير عزم تتراوح من 3.5 إلى 7.0، وبمسافات مركزية أقل من 50 كم.

وقد اختيرت مسافة التسجيل القصوى هذه وفقاً للملاحظة العامة التي تشير إلى أن موجات الجسم المباشرة عالية التردد التي تشع من تمزقات الزلازل الممتدة تهيمن على السعة في نطاق المسافة القريبة من المصدر، أي على مسافات من المصدر مماثلة لطول التمزق.

يوضح الشكل الآتي مواقع المحطات والزلازل المستخدمة في هذه الدراسة، بعد هذا الاختيار بناءً على المسافة القصوى بين المصدر والمستقبل.

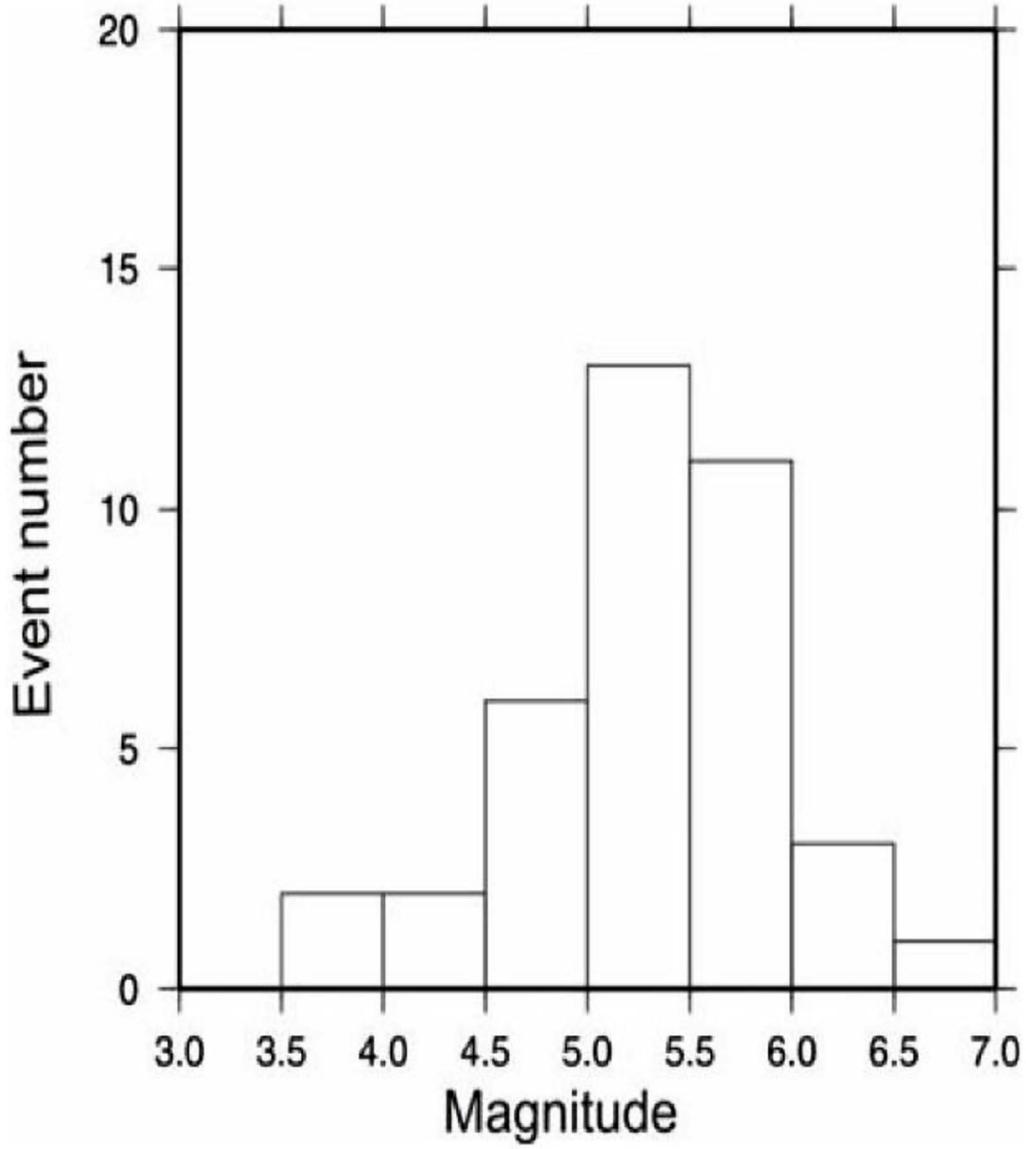




خريطة لمحطات الحركة القوية (يسار) والزلازل (يمين) المستخدمة في هذه الدراسة. تتناسب أحجام الرموز مع قدر الحدث.

ويرد في الشكل الآتي رسم بياني يوضح عدد السجلات مقابل قدرها. تقع معظم الأحداث المسجلة في النطاق $M 4.5-6.5$ ، في حين أن أكبر حدث في الكتالوج هو $M_w=7.0$ ، زلزال إيرينيا عام 1980، والذي تتوفر له 10 سجلات ضمن نطاق المسافة المدروس.





رسوم بيانية توضح عدد السجلات المرتبطة بالأحجام.





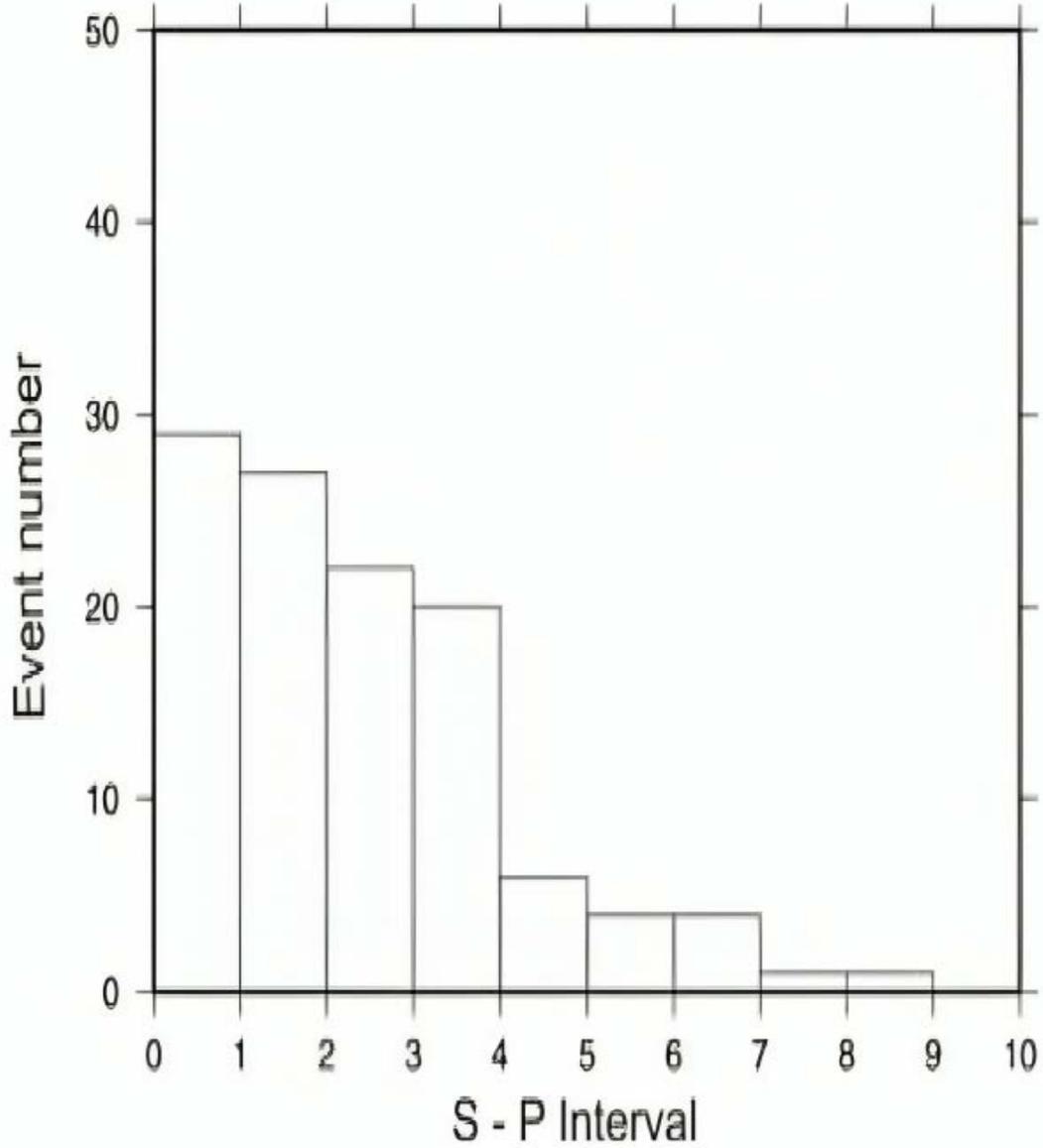
• قياسات كميات الحركة الأرضية القوية

شبكة الإنذار المبكر من الزلازل قيد الإنشاء في منطقة كامبانيا عبارة عن مجموعة زلزالية ديناميكية جداً وكثيفة بشكل خاص، بحيث ستكون إشارات الموجتين **P** و **S** غير المشبعة والمتاحة بعد ثوانٍ قليلة من وقوع حدث حيث يقع مركز الزلزال داخل المنطقة التي تغطيها الشبكة.

كان التحليل الأول الذي أجريناه هو تحديد واختيار تتابعات **S S-arrivals** الأولى من جميع سجلات الحركة القوية المحددة. باستخدام توفر موجات **S** الأولى المختارة، قام الباحثون بحساب الأوقات الأصلية للزلازل، ووصول **P** الأول المتوقع وأوقات التشغيل لكل من السجلات، أي الأوقات التي يجب ربطها بالعينة الأولى من السلسلة الزمنية. وافترضوا نموذج سرعة القشرة الأرضية المتجانس، $V_p=5.5$ و $V_s=3.2$ km/s. يعد هذا الإجراء مناسباً بشكل خاص لسجلات **SMA-1** التي لا تتوفر لها الأوقات المطلقة للتتبعات.

يعتمد اكتشاف الإشارة **S** على تحليل تباين السعة والتردد والاستقطاب الأفقي كوظائف للوقت على طول مخططات التسارع التي جرت تصنيفها بتمرير منخفض. سمح لنا توفر أوقات وصول الموجة **S** الأولى بتصنيف السجلات وفقاً لأوقات موجات **S-P** المقدر (كما في الشكل الآتي).



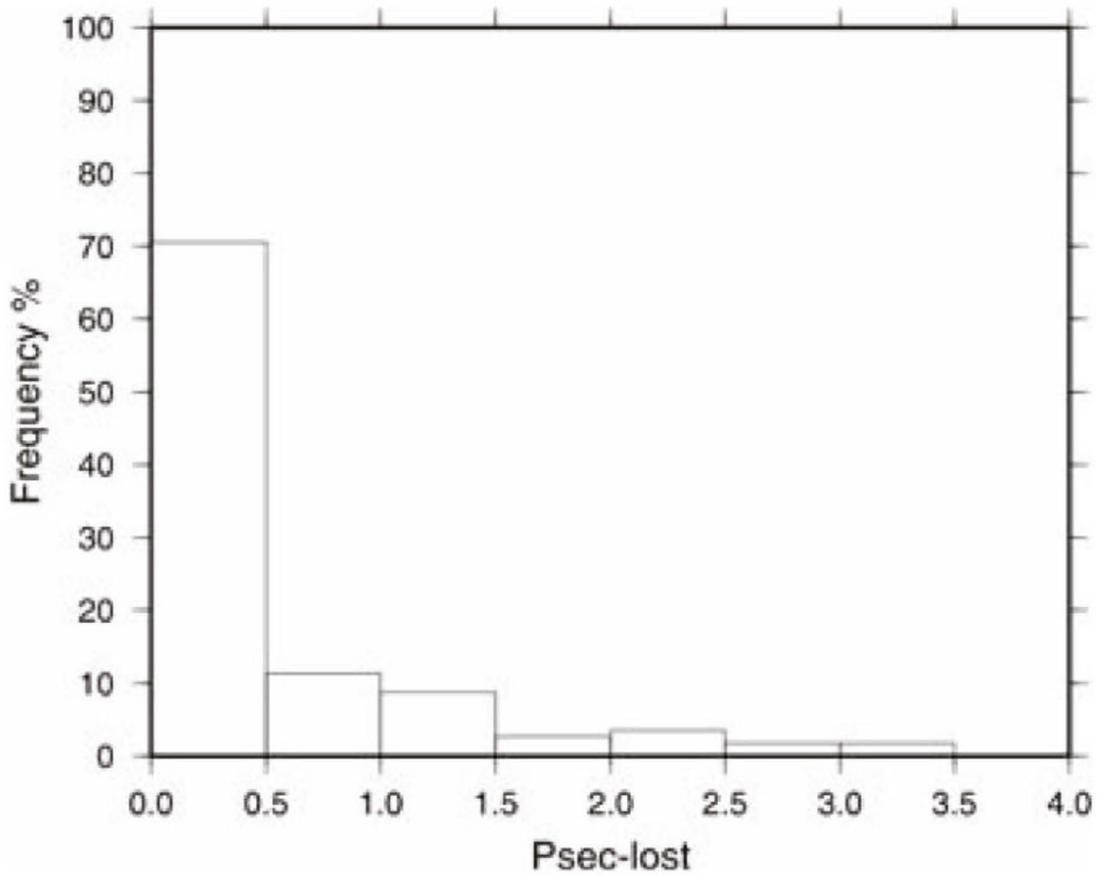


رسم بياني لعدد السجلات مقابل مرات S-P.





نظراً لأن مخططات التسارع SMA-1 يجري تشغيلها عمومًا عند وصول الموجة P أو لاحقًا، فقد حددنا أيضًا السجلات التي كانت أوقات التشغيل الخاصة بها متأخرة عن وصول P الأول المقدر (كما في الشكل الآتي).



رسم بياني لعدد الأحداث مقابل (b) T_p و T_{fs} وهي الأوقات المقدرة للعينات الأولى وأوقات وصول P الأولى، على التوالي، بالنسبة لمجموعة بيانات الحركة القوية المحددة.



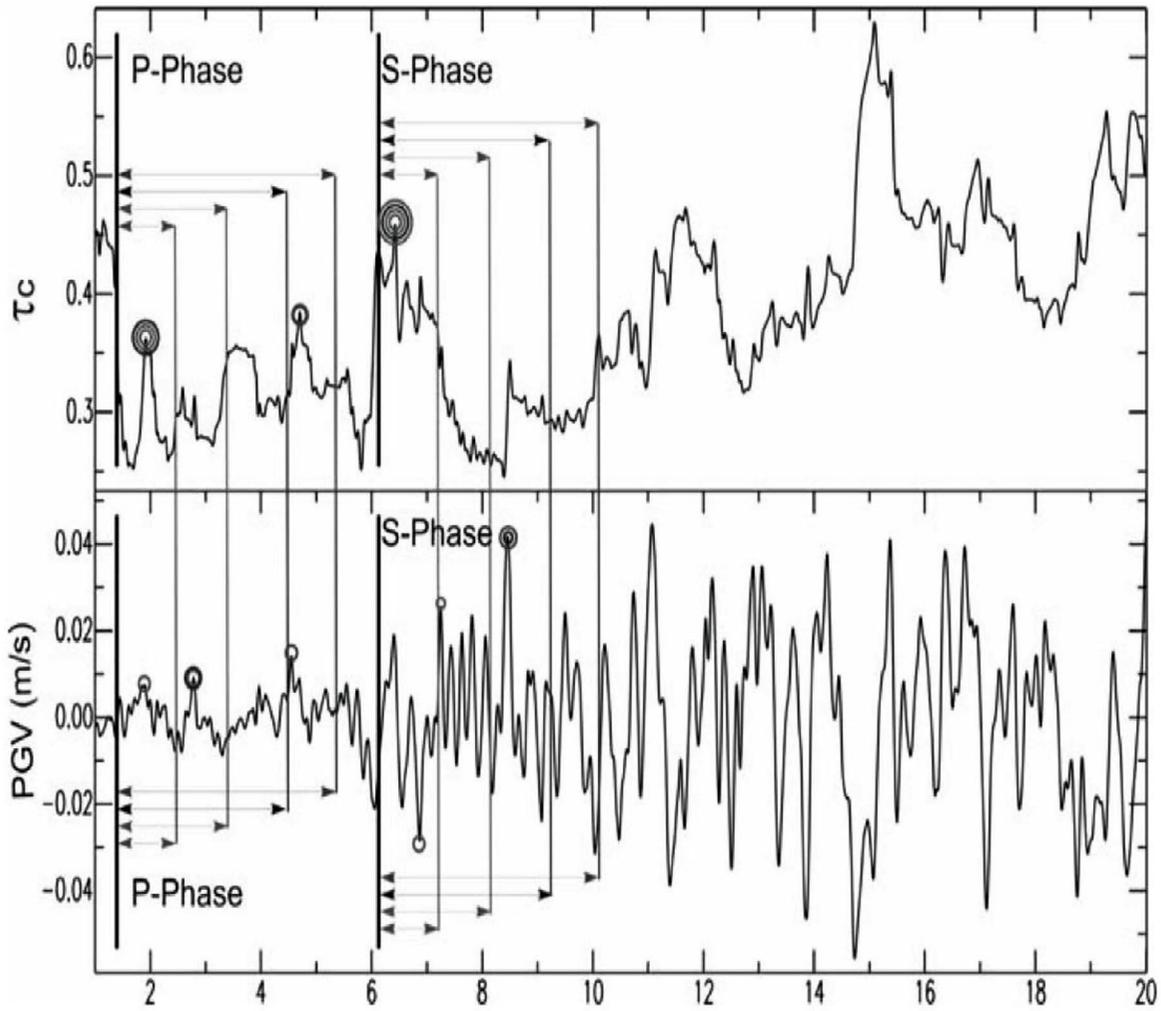


بالنسبة للغالبية العظمى من السجلات التي جرى تحليلها، تكون أوقات **SP** أقل من 4 ثوانٍ، مع وجود أقل من 25 سجلاً تُظهر **Tp - Tfs** أكبر من 4 ثوانٍ، حيث **Ts** و **Tp** هما الأوقات المقدرة للعينة الأولى وأول **P** الوصول على التوالي.

يشير هذا الفاصل الزمني القصير إلى حد ما لمحطات الحركة القوية الموجودة في نافذة المصدر القريب إلى أن المعلومات التي تحملها كل من موجات **P** وموجات **S** المبكرة يمكن استخدامها لتقديرات أحجام المصدر.

بدءاً من وصول الموجة **P** والموجة **S** الأولى المقدرة في كل سجل حركة قوية، أخذنا في الاعتبار النوافذ الزمنية المتزايدة للسجلات التي جرت تصنيفها بالتمرير المنخفض لتحديد معالم τ_c وذروة إزاحة الأرض والسرعة والتسارع (كما في الشكل الآتي).





مثال على تحليل سجل الحركة القوية. المنحني في الأعلى: مقابل الزمن. المنحني في الأسفل: سرعة الأرض القصوى مقابل الزمن. تزداد النوافذ الزمنية من 1 إلى 5 ثوانٍ بعد وصول الموجة P والموجة S الأولية. يستخدم المجموع الرأسي والجذر التربيعي للمكونات الأفقية لقياسات الموجة P والموجة S، على التوالي. يعتبر هذا الشكل مثالاً لقياسات كميات الحركة الأرضية مع نوافذها الزمنية النسبية، والتي يمكن إجراؤها على طول مخطط الزلازل بكامله.



لقد استخدم مرشح بتروورث ثنائي القطب ذو التحول الصفري الطور. بعد سلسلة من التجارب باستخدام ترددات زاوية منخفضة التمرير مختلفة، اختار الباحثون تردد تمرير منخفض قدره **3 هرتز**، والذي قدم أفضل النتائج من ناحية الارتباطات بين كميات الحركة الأرضية المرصودة ومقادير العزم.

كما استخدمت هذه القيمة البالغة **3 هرتز** أيضاً بواسطة الباحثين ألين و كاناموري (2003) لاسترداد علاقات τ_0 مقابل القدر ($M > 5.5$) باستخدام قاعدة بيانات الزلازل في كاليفورنيا.

جرت معالجة سجلات الحركة القوية المحددة من مجموعة بيانات الزلازل الإيطالية كما هو موضح أعلاه، لكميات الحركة القوية التالية:

- **PGAt** (ذروة التسارع الأرضي في نافذة زمنية مدتها t)،
- **PGVt** (سرعة الأرض القصوى في نافذة زمنية مدتها t)،
- **PGDt** (ذروة إزاحة الأرض في نافذة زمنية مدتها t)،
- **Wc** [الفترة السائدة، حسب تعريف ألين و كاناموري (2003)].

أمكن قياس هذه ضمن نوافذ زمنية متزايدة، مع وقت إضافي قدره ثانية واحدة، بدءاً من وصول أول موجة **P** وموجة **S**. تستخدم المكونات الرأسية و«مجموع الجذر التربيعي» للمكونات الأفقية لقياسات الموجة **P** والموجة **S**، على التوالي.

جرى اختبار الأهمية الإحصائية للسجل (المعلمة) مقابل ارتباطات القدر من خلال تطبيق «اختبار الارتباط» **Correlation Test**.





بالنظر إلى كمية البيانات ومستوى الأهمية المتوقع، يوفر اختبار الارتباط عتبة لمعامل الارتباط والتي فوقها يمكن اعتبار العلاقات الخطية التي يمكن الحصول عليها ذات دلالة إحصائية، مع وجود خطأ من النوع الأول يحدده مستوى الأهمية المعين. لكل نافذة زمنية محددة بعد وصول **P** و **S** الأول، يوضح الشكل 4.9 معامل الارتباط المقاس لكل كمية حركة أرضية مقاسة، إلى جانب عتبة اختبار الارتباط لمستوى الأهمية المعين.

نظراً لأن معاملات الارتباط أعلى بكثير لقياسات الموجة **S** مقارنةً بموجات **P**، فقد اخترنا مستويين مختلفين من أهمية الاختبار لنوعي البيانات: **0.5%** و **5.0%**، على التوالي. وهذا يعني أنه مع إشارة ألفا إلى مستوى أهمية الاختبار، إذا كان معامل الارتباط أكبر من ألفا، فإن احتمال ارتكاب خطأ من النوع الأول (أي قبول فرضية العلاقة الخطية بين السجل (المعلم) والقدر) أصغر من ألفا.

تظهر نتائج تحليل الارتباط بين كميات الحركة الأرضية وأحجام العزم أن **3** هرتز، والإزاحة ذات التمرير المنخفض وكميات الذروة للسرعة يمكن اعتبارها قدرات جيدة للقدر في سجلات الحركة القوية، عند قياسها بـ **2-3** نوافذ زمنية واسعة بعد وصول الموجة **P** والموجة **S** الأولية.

يبدو أن المعلم τ_c مرتبط بشكل جيد بشكل خاص بالقدر الموجود في سجلات الموجة **S** عند $t > 3$ ثانية، بينما بالنسبة للموجات **P**، شوهد ارتباط مقبول فقط في النافذة الزمنية $t = 3$ ثانية.





في الختام، يعتبر الباحثون الملاحظات والأفكار التي جرى تطويرها في هذا العمل بمثابة خطوة أولية ولكنها مهمة نحو تطوير إجراء قوي وموثوق لتقديرات الأحجام في الوقت الفعلي لتطبيقات الإنذار المبكر من الزلازل.

ومع ذلك، من المقرر إجراء دراسة أكثر دقة في المستقبل القريب، والتي ستوفر تكامل البيانات التي تغطي بشكل موحد نطاق القدر قيد البحث، والتي ستواصل استكشاف الآثار المترتبة على فيزياء مصادر الزلازل والتي ستشأ من تأكيد نتائج الدراسة الحالية.





منهجية الإنذار المبكر بالزلازل ElarmS وتطبيقها في الولايات المتحدة الأمريكية (تجربة كاليفورنيا نموذجاً)

يركز التخفيف الحالي من الزلازل في الولايات المتحدة على التوصيف طويل المدى للمستويات المحتملة من اهتزاز الأرض وتكرار حدوثها. هذه التقديرات هي الأساس لقوانين البناء التي تهدف إلى منع الانهيار أثناء الزلازل.

ويعتبر هذا النهج فعالاً جداً في الحد من الوفيات ولكن ليس بالضرورة في تقليل تكلفة الزلازل. في حين أن المباني قد لا تنهار أثناء الزلزال، إلا أنها قد تعاني من أضرار هيكلية تتطلب هدمها.

وفي بلدان أخرى، بما في ذلك المكسيك واليابان وتايوان وتركيا، يجري استخدام أنظمة الإنذار بالزلازل (EWS) بالإضافة إلى قوانين البناء لزيادة تقليل تأثير الزلازل. وتتخذ إجراءات تخفيف قصيرة المدى في هذه البلدان لتقليل الخسائر المالية والإصابات.

تكتشف أنظمة الإنذار المبكر من الزلازل بسرعة بدء الزلازل وتحذر من اهتزاز الأرض المرتقب. بالنسبة لمدينة معينة، مثل سان فرانسيسكو، يمكن أن يصل وقت التحذير إلى عشرات الثواني لبعض الزلازل، بينما يصل إلى صفر ثانية لبعض الزلازل.

ومع ذلك، في المواقع التي تحصل فيها سان فرانسيسكو على تحذير بقيمة صفر ثانية، من المحتمل أن تحصل المدن المحيطة مثل أوكلاند على بضع ثوانٍ وستحصل سان خوسيه على تحذير لمدة 15 ثانية تقريباً.





ومن ثم، بالنسبة لأي سيناريو زلزال في منطقة ذات كثافة سكانية عالية، مثل منطقة خليج سان فرانسيسكو (SFBA) أو منطقة لوس أنجلوس الحضرية (LAMA)، يمكن أن يوفر نظام الإنذار المبكر تحذيراً لبعض السكان المتضررين على الأقل في حالة وقوع زلزال مدمر.

نقدم هنا منهجية واحدة لنظام الإنذار المبكر يمكن تنفيذها في كاليفورنيا ومناطق أخرى حول العالم. جرى تصميم نظام إنذار الزلازل «ElarmS» للتنبؤ بتوزيع ذروة الهزات الأرضية عبر المنطقة المتضررة من الزلزال قبل بداية الحركة الأرضية الكبيرة (انظر الموقع: <http://www.ElarmS.org>).

يستخدم نظام ElarmS الثواني القليلة الأولى من وصول الموجة P إلى أقرب المحطات إلى مركز الزلزال لتحديد موقع الزلزال وتقدير قدره. يجري بعد ذلك إنشاء خريطة - AlertMap - للاهتزازات الأرضية المتوقعة وتحديثها مع توفر المزيد من المعلومات.

طبق الباحثون المنهجية على المشكلة المحددة المتمثلة في التحذير من الزلازل في جنوب وشمال كاليفورنيا باستخدام مجموعات بيانات الزلازل الماضية والمحتملة في المستقبل. في جنوب كاليفورنيا، استخدموا مجموعة من الزلازل السابقة وطبقوا المنهجية لتحديد دقة التحذيرات الناتجة. وفي شمال كاليفورنيا، قاموا بتقدير أوقات التحذير التي ستكون متاحة للمواقع عبر منطقة SFBA لجميع الزلازل المستقبلية المحتملة التي حددها فريق العمل المعني باحتمالات الزلازل في كاليفورنيا (2003).





• منهجية ElarmS

جرى تصميم منهجية **ElarmS** بهدف التنبؤ بتوزيع ذروة اهتزاز الأرض عبر المنطقة المتضررة من الزلزال قبل بداية حركة أرضية كبيرة في مركز الزلزال. تستخدم الثواني القليلة الأولى من الموجة **P** في المحطة والمحطات الأقرب إلى مركز الزلزال لتقدير قدر الزلزال وتوفير علاقات التوهين التوزيع المتوقع لاهتزاز الأرض كدالة للمسافة من مركز الزلزال.

لقد صُمم نظام **ElarmS** الكامل لإنشاء خريطة لذروة الهزات الأرضية المتوقعة، وهي خريطة **ShakeMap** متوقعة نسميها «**AlertMap**». تتوفر خريطة التنبؤ الأولى بعد ثانية واحدة من إطلاق أول موجة **P** ويجري تحديثها كل ثانية حيث تجمع بيانات إضافية من محطات أبعد عن مركز الزلزال. فيما يأتي، سنوضح المكونات الثلاثة لنظام **ElarmS**.

• موقع الزلزال وتقدير وقت التحذير

يجري تحديد موقع الزلازل باستخدام أوقات وصول الموجات **P**. عندما تُشغّل المحطة الأولى، يقع حدث في تلك المحطة بعمق نموذجي للأحداث في المنطقة.

يجري بعد ذلك تحديد موقع الزلزال بين المحطتين الأوليين، ثم الثلاثة الأولى، للمحطات التي ستطلق. بمجرد تشغيل أربع محطات، تستخدم طريقة بحث الشبكة لتحديد موقع الحدث، مما يقلل من عدم التوافق بين أوقات الوصول المتوقعة والمرصودة.

يعرّف وقت التحذير على أنه الوقت المتبقي حتى بداية ذروة اهتزاز الأرض ويمكن تقديره بالنظر إلى وقت منشأ الزلزال وموقعه باستخدام منحنيات وقت وصول الموجة





S. يوفر استخدام وقت وصول S المتوقع تقديرًا متحفظًا لوقت التحذير المتبقي. في الزلازل الأكبر قدرًا، مثل نورثريدج ولوما بريتا، حدثت ذروة اهتزاز الأرض بعد 5-10 ثوانٍ من وصول S إلى محطات تبعد عشرات الكيلومترات عن مركز الزلزال.

• التقدير السريع لقدّر الزلازل

جرى تقدير قدرّ الزلزال بسرعة باستخدام محتوى التردد للثواني الأربع الأولى من وصول الموجة P. تُحسب الفترة السائدة، لشكل موجة المكون الرأسي باستخدام الطريقة التي وصفها الباحث ناكامورا لأول مرة (1988)، وعثر على القيمة القصوى خلال 4 ثوانٍ، قابلة للقياس مع قدرّ الحدث. قبل حساب، يجري تحويل تسجيلات مقياس التسارع إلى سرعة وتجري كل المعالجة بشكل متكرر بطريقة سببية. ويُحدد بشكل مستمر في الوقت الفعلي من شكل موجة سرعة المكون الرأسي باستخدام العلاقة:

$$\tau_i^P = 2\pi\sqrt{X_i/D_i} \quad (3.1)$$

حيث إن:

$$X_i = \alpha X_{i-1} + x_i^2 \quad (3.2)$$

$$D_i = \alpha D_{i-1} + \left(\frac{dx}{dt}\right)_i^2 \quad (3.3)$$





x_i هي الحركة الأرضية المسجلة في الوقت i و α هو ثابت تجانس 1 ثانية (ليبيانات $100 \text{ sps } \alpha = 0.99$ ، وليبيانات $20 \text{ sps } \alpha = 0.95$). يمكن قياس محتوى التردد الأعلى للزلازل ذات القدر الأصغر خلال فترة زمنية أقصر بعد وصول الموجة P من طاقة التردد المنخفض للأحداث الأكبر.

وفي المقابل، يمكن تحديد قدر الأحداث الأصغر بسرعة أكبر من تحديد قدر الأحداث الأكبر. ويعني هذا أيضاً أن تقدير القدر بعد ثانية واحدة هو تقدير أدنى، وبمجرد توفر بيانات 2 و 3 و 4 ثوان، قد يزيد تقدير القدر.

تستخدم علاقته خطيتين بين الحد الأقصى، والقدر. بالنسبة للزلازل الأصغر قدرًا (بقوة 3.0 إلى 5.0)، تستخدم بيانات النطاق العريض التي يمكن تصفيتها بتمرير منخفض عند 10 هرتز ويمكن تقدير قدرها بشكل جيد في ضوء ثانية واحدة فقط من البيانات. مع ثانيتين من البيانات، يقل خطأ القدر قليلاً، لكن البيانات الإضافية لا تحسن التقدير.

باستخدام أرصاد من أشكال موجة النطاق العريض بعد ثانيتين وتقليل متوسط الانحراف المطلق، تحدد العلاقة:

$$m_l = 6.3 \log(\tau_p^{\max}) + 7.1 \quad (3.4)$$

لتقدير قدر الزلازل ذات القوة المنخفضة. بالنسبة للأحداث الأكبر قدرًا (قدر أكبر من 4.5)، يمكن الحصول على تقديرات أفضل باستخدام مرشح تمرير منخفض بتردد 3 هرتز، وتتطلب أفضل تقديرات القدر 4 ثوانٍ من البيانات، مع أنه يمكن إجراء تقديرات الحد الأدنى للقدر بمجرد 1، 2 و 3 ثوانٍ





بعد وصول P . أفضل علاقة ذات قدر كبير مناسبة هي:

$$m_h = 7.0 \log(\tau_p^{\max}) + 5.9. \quad (3.5)$$

يمكن استخدام كل من m_h و m_l بواسطة ElarmS لإنتاج أفضل تقدير للقدّر. في البداية، بعد ثانية واحدة من تشغيل المحطة، يحسب m_l من ، وعندما تتوفر ثانيتان من البيانات، يمكن تحديث التقدير.

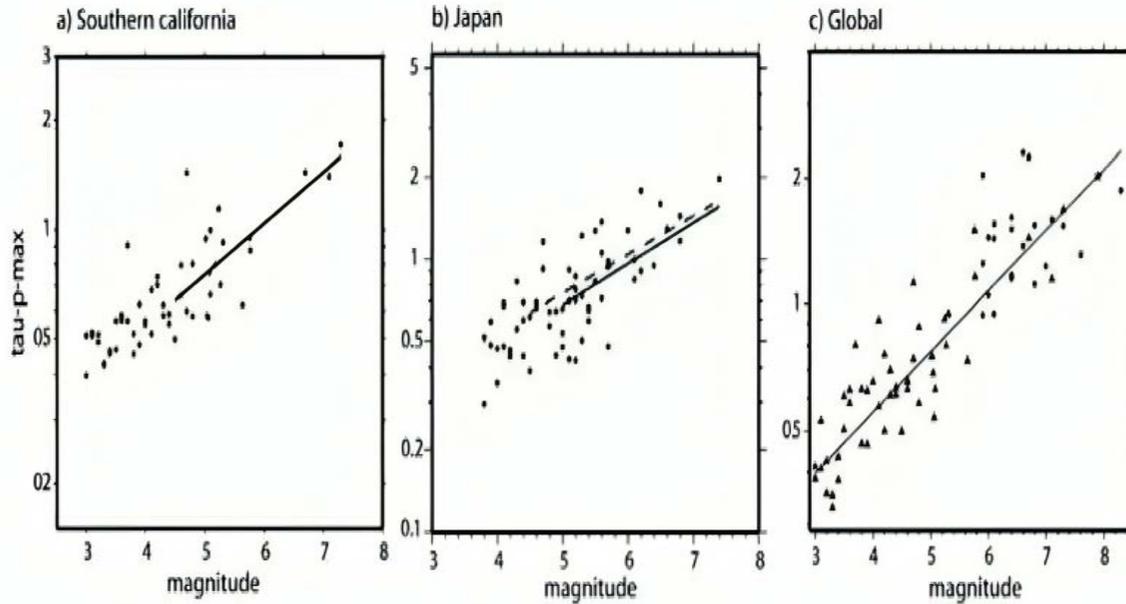
يجري حساب متوسط تقديرات قدر المحطة (واحدة من كل محطة مشغلة) لتوفير تقدير لقدر الحدث. إذا أصبح تقدير قدر الحدث أكبر من 4.0، فسيحسب m_h أيضاً وتقدير قدر الحدث هو متوسط كل من m_h و m_l من كل محطة جرى تشغيلها.

حيث تظهر مجموعات البيانات ذات نطاق واسع من جنوب كاليفورنيا واليابان علاقة قياس مماثلة بين قيمة وقدرها، وتشير مجموعة البيانات العالمية بما في ذلك الأشكال الموجية من جنوب كاليفورنيا واليابان وتايوان وزلزال دينالي في ألاسكا إلى أن علاقة القياس لا تنهار حتى بالنسبة لأكبر الزلازل.

وتعتمد دقة تقديرات القدر على عدد المحطات التي توفر بيانات الموجة P . ويبين الشكل الآتي كيف يتناقص متوسط الخطأ في تقديرات القدر مع دمج عمليات رصد في محطات متعددة لتوفير تقدير متوسط للقدّر.

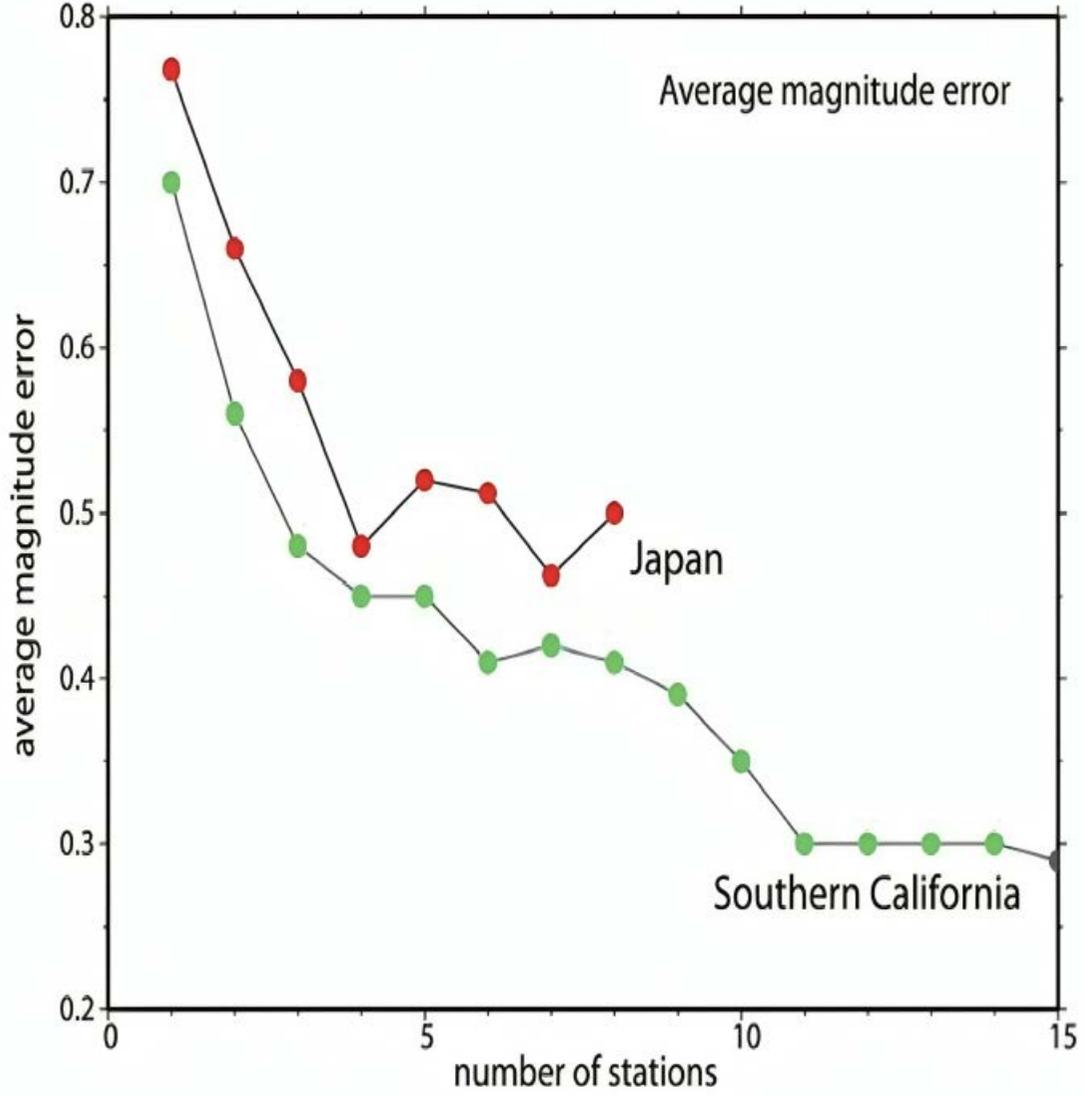
لقد حُسب للزلازل التي تتراوح قوتها من 3.0 إلى 8.3 من مناطق مختلفة حول العالم كما في الشكل الآتي.





علاقة القياس بين الحد الأقصى لمتوسط الحدث وقدره. جرت معالجة جميع البيانات باستخدام الخوارزميات العائدة نفسها. (a) زلازل جنوب كاليفورنيا والعلاقة الأفضل (الخط الصلب). (b) الزلازل في اليابان والعلاقة الأفضل (الخط المتصل). الخط المتقطع هو أفضل علاقة مناسبة لكاليفورنيا الموضحة في a، وهي متطابقة تقريباً. (c) التجميع العالمي للزلازل بما في ذلك جنوب كاليفورنيا واليابان وتايوان وزلازل دينالي. الأشكال الموجية هي مزيج من مقاييس التسارع وأدوات سرعة النطاق العريض.





متوسط الخطأ المطلق في تقديرات القدر كدالة لعدد المحطات التي توفر بيانات الموجة P لجميع الأحداث التي أمكن دراستها في جنوب كاليفورنيا (الأخضر) واليابان (الأحمر). باستخدام محطة واحدة، يبلغ متوسط الخطأ نحو 0.75 وحدة قدر، وينخفض إلى ~0.6 مع محطتين و~0.5 بمجرد توفير 4 محطات للبيانات.





حيث تظهر مجموعات البيانات من جنوب كاليفورنيا واليابان علاقة مماثلة. باستخدام أقرب محطة فقط إلى مركز الزلزال، يبلغ متوسط قدر الخطأ نحو **0.75** وحدة قدر؛ بمجرد توفر البيانات من أقرب محطتين، ينخفض الخطأ إلى **~0.6**، وإلى **~0.5** القدر بمجرد توفير **4 محطات** للبيانات.

• التنبؤ بتوزيع الهزات الأرضية

بالنظر إلى موقع الزلزال وقدره، يمكن تقدير التوزيع المكاني لذروة اهتزاز الأرض باستخدام علاقات التوهين. تستخدم معظم العلاقات الحالية فقط أرصاد الحركة الأرضية للزلازل التي تزيد قوتها عن **5.0**.

يستخدم **ElarmS** علاقات التوهين الخاصة به والتي جرى تطويرها من الأرصاد الإقليمية للأحداث ذات القدر الأكبر من **3.0**. يعد تصميم **ElarmS** ليكون جاهزاً للعمل أثناء الأحداث المتكررة ذات القدر المنخفض بالإضافة إلى الأحداث الكبيرة أمراً مرغوباً فيه من أجل اختبار النظام باستمرار.

لقد جرى استخدام العديد من الأشكال الوظيفية المختلفة لأنواع مختلفة من الزلازل في مناطق مختلفة، ولكن معظمها يعتمد على الشكل الوظيفي:

$$A = A_0 r^n e^{-kr} \quad (3.6)$$

حيث إن **A** هي ذروة تسارع الأرض (**PGA**) على مسافة **r**، و **A₀** و **n** و **k** هي ثوابت يجب تحديدها. يحوي هذا الشكل الوظيفي على مصطلح للانتشار الهندسي، **rⁿ**، ومصطلح للتوهين الجوهري، **e^{-kr}**.



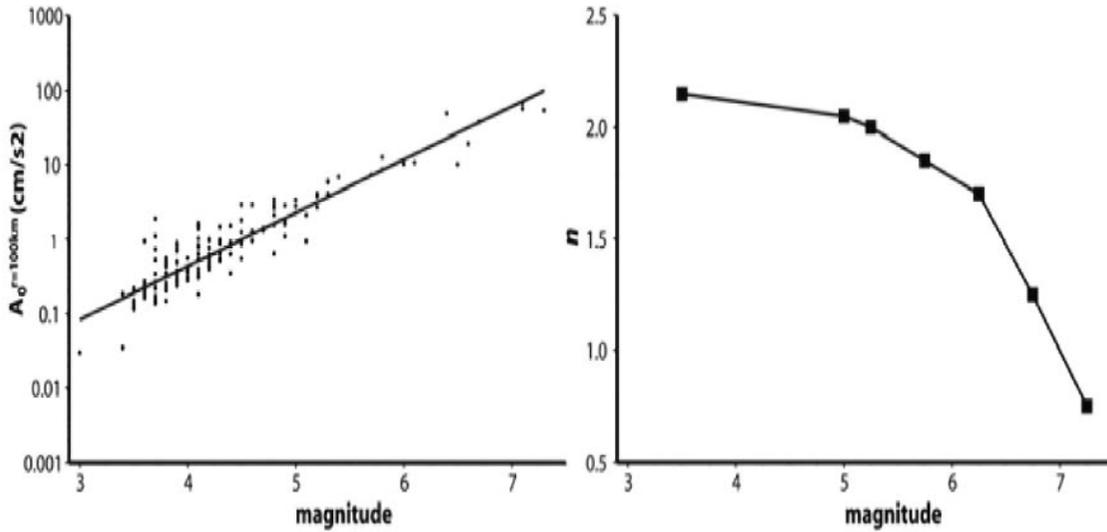


باستخدام مجموعة بيانات من الزلازل المحلية التي تتراوح قوتها من 3.0 إلى 7.3 من جنوب كاليفورنيا، أمكن تحديد أفضل علاقات التوهين للمنطقة. لم يكن تأثير التوهين الجوهري كبيراً خلال 200 كيلومتر من الحدث، لذلك ضُبط k على الصفر لتقليل المجهول في الانحدار. جرى تحديد n كدالة للقدّر من خلال تجميع أرصاد PGA حسب القدر وحساب أفضل n مناسب. بعد تحديد n ، حُسب A_0 لكل حدث وأمکن الحصول على أفضل علاقة خطية مناسبة بين A_0 والقدّر. يوضح الشكل الآتي كيف يختلف A_0 و n كدالة قدر. يستخدم $ElarmS$ علاقات التوهين في عملية مكونة من مرحلتين. بعد ثانية واحدة من إطلاق الموجة P الأولى، يتوفر التقدير الأول للقدّر. ونظراً للمقدار، يجري تحديد A_0 و n من العلاقات المبينة في الشكل الآتي، ويحسب PGA المقدر كدالة للمسافة.

مع تقدم الوقت خلال تسلسل الحدث، تقوم المحطات الأقرب إلى مركز الزلزال بقياس PGA الخاصة بها. وبمجرد توفر هذه المعلومات من عدد قليل من المحطات، يستخدم لضبط علاقة التوهين عن طريق الحفاظ على n ثابتاً مع السماح لـ A_0 بالتغيير من أجل ملاءمة علاقة التوهين لملاحظات PGA بشكل أفضل.

ويبين الشكل الآتي أمثلة على علاقات التوهين للعديد من الزلازل. لاحظ التناقض بين الأرصاد والتنبؤات الخاصة بعلاقات التوهين في المجال (2000). يعد هذا التناقض مشكلة شائعة عند استخدام علاقات التوهين التي يجري تحديدها من الأحداث ذات القدر الأكبر فقط.

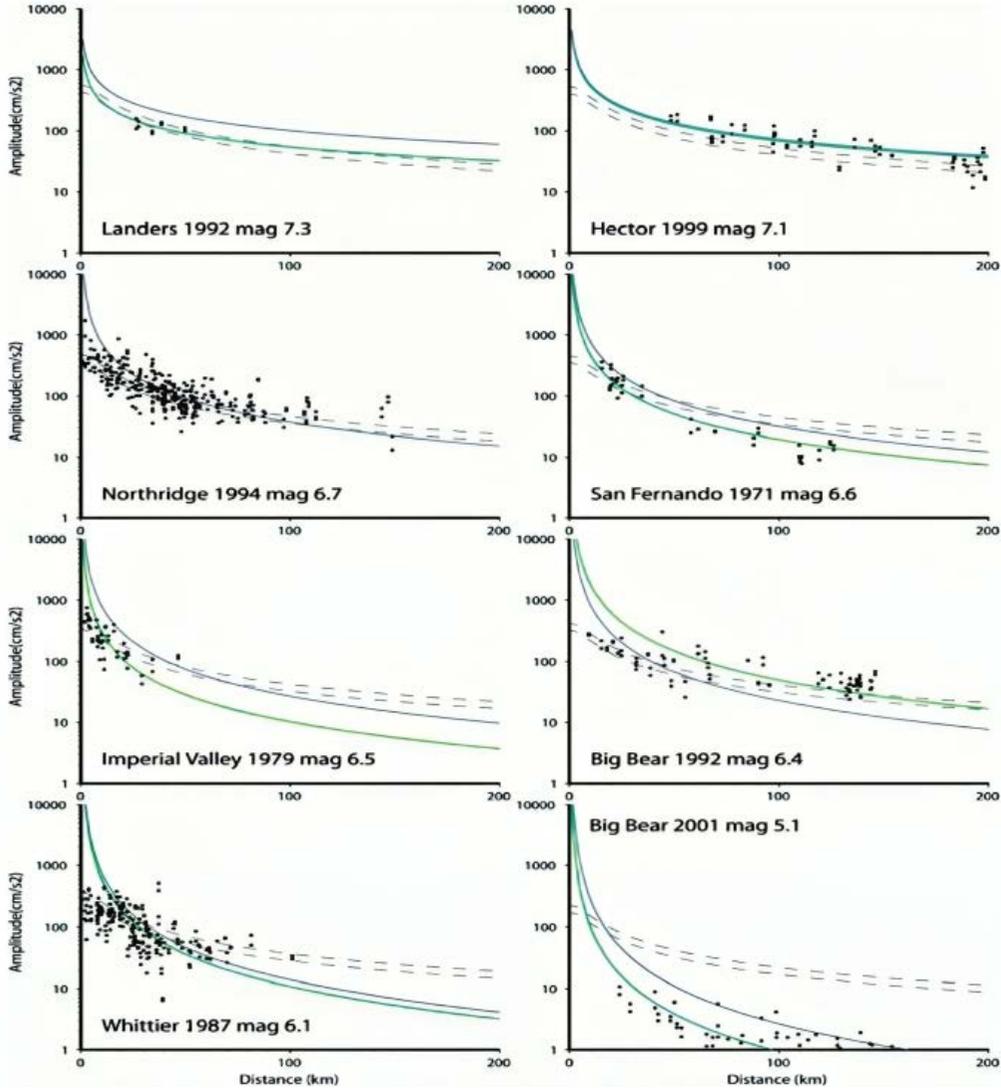




القيم المحددة تجريبياً لـ n و A_0 كدالة لقدّر الزلزال. أمكن تجميع ملاحظات PGA في البداية حسب القُدْر وجرى تحديد n لكل مجموعة عن طريق الانحدار. بعد تحديد n ، وحُسب أفضل ملاءمة A_0 (المحددة بالسعة عند $r = 100$ km) لكل حدث. يوفر الانحدار الخطي A_0 كدالة للقُدْر.

علاقات التوهين الموصوفة هنا لا تأخذ في الاعتبار تأثيرات التضخيم القريبة من السطح، مثل الصخور مقابل التربة، والتي تكون مسؤولة عن الكثير من الانتثار في عمليات رصد التسارع الموضحة في الشكل الآتي، مع أن تصحيحات الموقع ليست حالياً جزءاً من **ElarmS**، إلا أنه يمكن تضمينها بسهولة عند معرفتها.





أمثلة على علاقات التوهين (الخطوط) ومراقبة PGA (النقاط) لثمانية زلازل في جنوب كاليفورنيا تتراوح قوتها من 5.1 إلى 7.3. تُظهر الخطوط الرمادية علاقات التوهين ElarmS المحددة بالنظر إلى قدر الزلزال فقط، والخطوط الخضراء هي نتيجة ضبط العلاقة بناءً على ملاحظات PGA. تُظهر الخطوط المتقطعة علاقات التوهين الميدانية (2000) للصخور والترية للمقارنة.





• دقة التحذيرات وتوقيتها

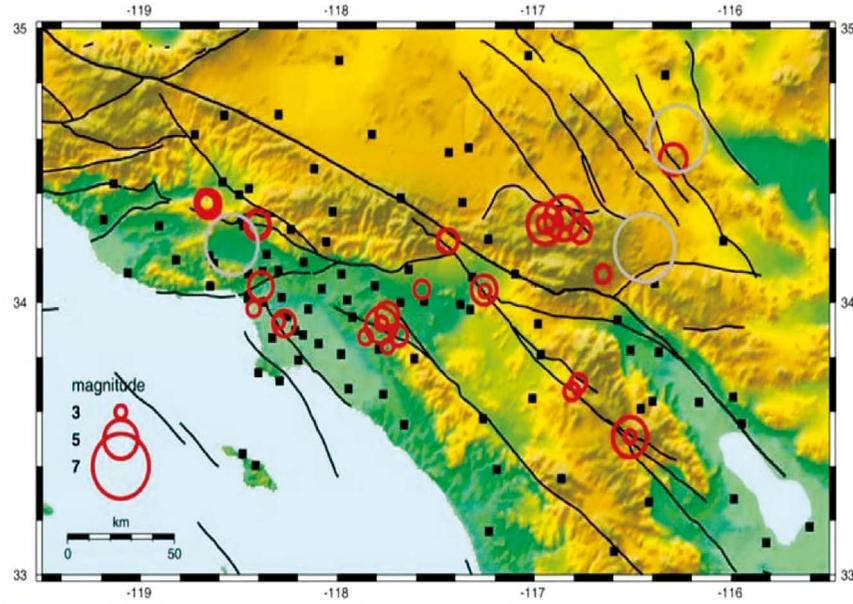
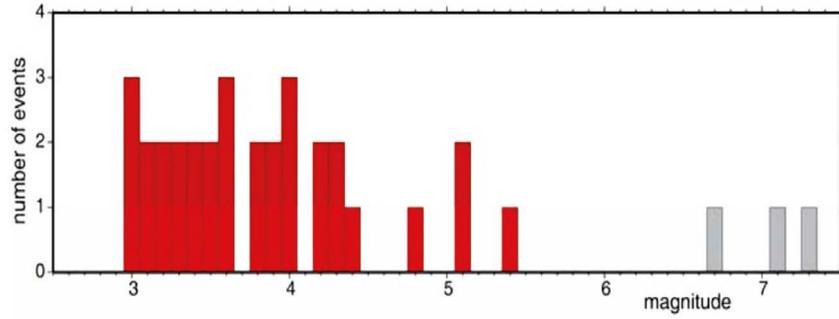
لاختبار دقة وتوقيت معلومات التحذير، قام الباحثون بجمع مجموعة بيانات من **32 زلزالاً** من جنوب كاليفورنيا. جرى اختيار الأحداث لإعطاء أكبر نطاق ممكن من القدر ولتشمل الأحداث التي تحدث أسفل الأجزاء الأكثر كثافة من شبكة النطاق العريض الحالية.

أمكن تضمين الزلازل التي تتراوح قوتها من **3.0** إلى **5.4** كما هو موضح في الشكل الآتي. جميع الأحداث التي تبلغ قوتها أكبر من **5.4** إما حدثت قبل إنشاء الشبكة الزلزالية الحالية، أو كانت في مواقع تكون فيها الشبكة متناثرة.





أنظمة الانذار المبكر للزلازل



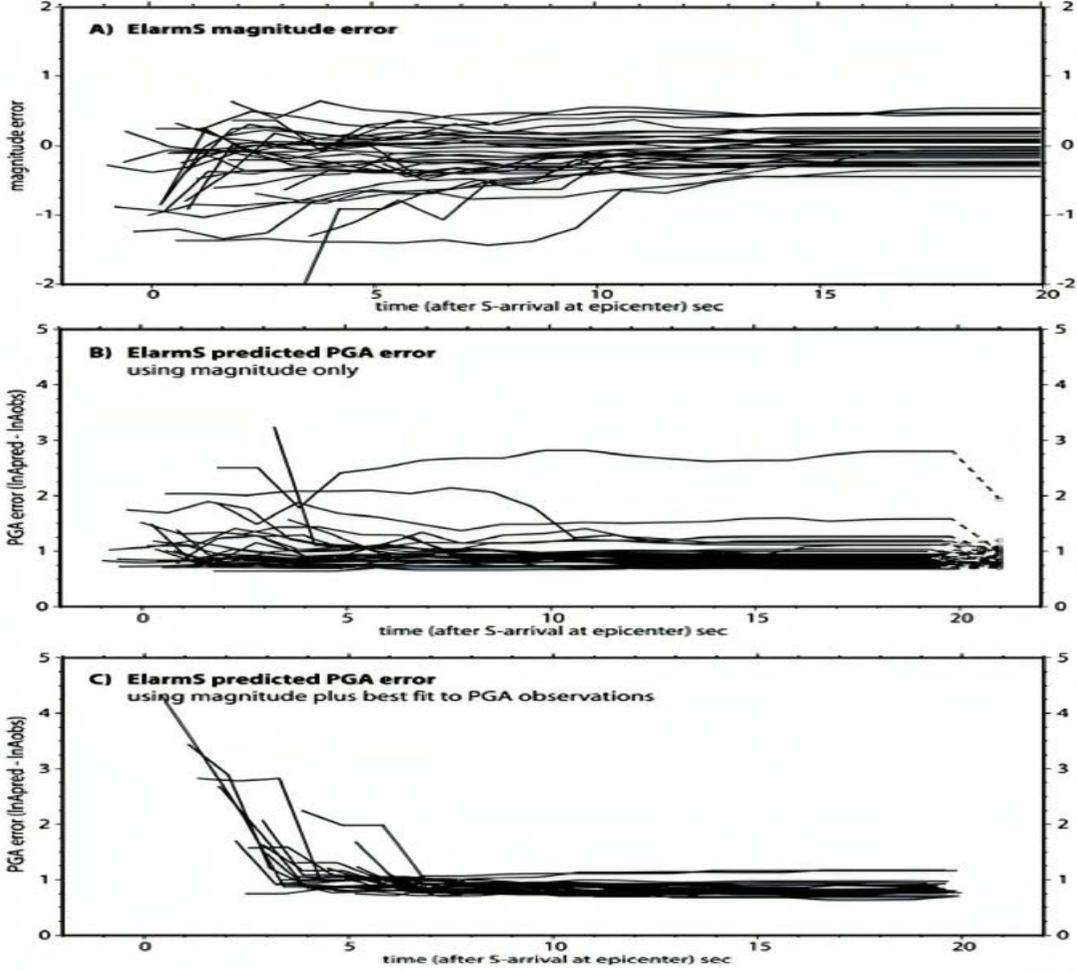
خريطة لجنوب كاليفورنيا توضح الزلازل الـ 32 المستخدمة لتقييم دقة وتوقيت التحذيرات من اهتزاز الأرض. وقعت الأحداث الـ 32 تحت الأجزاء الأكثر كثافة من الشبكة الزلزالية في المناطق التي تعد أيضاً الأكثر كثافة سكانية. ويبين الرسم البياني توزيع قدر الأحداث المدرجة (الأحمر). لم تتضمن الأحداث الثلاثة الأكبر قدرًا (اللون الرمادي على الخريطة والرسم البياني) لأنها لم تحدث تحت المصفوفة الكثيفة الحالية.





تجري معالجة مجموعات بيانات الشكل الموجي من هذه الأحداث باستخدام منهجية **ElarmS** لتحديد القدر واهتزاز الأرض المتوقع (**PGA**) كدالة للوقت. لقد وجدنا أن تقديرات القدر الأولي وتقديرات **PGA** متاحة لـ **56%** من الزلازل بحلول الوقت الذي وصلت فيه الموجة إلى السطح كما في الشكل الآتي.





صممت نتائج اختبار ElarmS دون الاتصال بالإنترنت باستخدام مجموعة من 32 زلزالاً في جنوب كاليفورنيا لتقييم دقة معلومات التحذير وتوقيتها نظراً للتوزيع الحالي للمحطات. تُظهر جميع اللوحات الأخطاء كدالة للوقت فيما يتعلق بوصول الموجة S إلى مركز الزلزال، والذي يمثل أقرب وقت لذروة اهتزاز الأرض أثناء الزلزال. **A.** الخطأ في تقدير القدر. **B.** متوسط الخطأ المطلق في تقديرات PGA في جميع المحطات باستخدام تقديرات القدر والموقع المتوفرة وعلاقات التوهين لـ ElarmS. الدوائر المفتوحة في أقصى اليمين هي الأخطاء عند استخدام القدر الحقيقي. **C.** متوسط الخطأ في PGA بمجرد دمج ملاحظات PGA المتاحة. يحسب الخطأ في تقديرات PGA بالطريقة المعتادة: الخطأ هو اللوغاريتم الطبيعي لـ PGA المتوقع مطروحاً منه اللوغاريتم الطبيعي لـ PGA المرصود للحدث.



استخدم الباحثون وصول **S** إلى مركز الزلزال كوقت صفر، لأن هذا هو أقرب وقت ممكن لذروة اهتزاز الأرض على السطح، مع أنه في الزلازل كبيرة القدر، تحدث ذروة اهتزاز الأرض عادةً بعد **5** إلى **10 ثوانٍ** من وصول موجة **S** في المواقع المحلية. لا يتضمن هذا الاختبار أي تأخير في نقل البيانات، مما قد يؤدي إلى تأخير التحذيرات لمدة ثانية أو ثانيتين، اعتماداً على كيفية تنفيذ خوارزميات الإنذار المبكر. ومع ذلك، لوحظ أن التأخير المحتمل في القياس عن بعد أقل من تأخير ذروة اهتزاز الأرض بالنسبة للزلازل ذات القدر الكبير. مع عدم وجود تأخير في القياس عن بعد وذروة اهتزاز الأرض في وقت وصول الموجة، ستكون التحذيرات متاحة لأكثر من **50%** من الزلازل في مركز الزلزال. إذا كان هناك تأخير في القياس عن بعد لمدة ثانيتين، فسيكون التحذير متاحاً لأكثر من **50%** من الزلازل في مواقع أكبر من **8 كم** تقريباً من مركز الزلزال. هذه «المنطقة العمياء» القريبة من مركز الزلزال، حيث قد لا يكون التحذير متاحاً باستخدام **ElarmS**، هي أيضاً المنطقة التي من المحتمل أن تحدث فيها بعض أشد الأضرار.

يمكن لنهج المحطة الواحدة للإنذار المبكر في الموقع أن يوفر معلومات عن المخاطر في الوقت المناسب في هذه المناطق. وتجدر الإشارة أيضاً إلى أن شدة اهتزاز الأرض قد تكون أقل خارج المنطقة العمياء عنها داخلها، إلا أن إجمالي التعرض للخطر خارج المنطقة العمياء قد يكون أكبر منه داخلها.

على سبيل المثال، وضعت علامة حمراء على المباني باعتبارها غير آمنة من الناحية الهيكلية ومن المقرر هدمها على مسافة تصل إلى **60 كيلومتراً** من مركز الزلزال في زلزال نورثريدج عام **1994** في لاما. وفي هذه الحالة، كانت





المنطقة العمياء التي يبلغ قطرها **8 كيلومترات** تمثل أقل من **2%** من إجمالي المساحة المتضررة بشدة من الزلزال.

في حين أن التنبؤ الأول بالخطر يكون متاحاً بعد ثانية واحدة من وصول الموجة **P** الأولى، فإن غالبية التنبؤات الأولية في الشكل السابق تعتمد على أوقات الإطلاق وتقديرات القدر من أكثر من محطة زلزالية واحدة.

تقوم الخوارزميات غير المتصلة بالإنترنت المستخدمة في هذا الاختبار بجمع جميع المعلومات المتاحة وتحديث تقديرات المخاطر مرة واحدة في الثانية. كثافة المحطات الزلزالية (عادةً **20 كيلومتراً** متباعدة في المناطق المأهولة بالسكان) تعني أنه خلال فترة زمنية قدرها ثانية واحدة، يجري تشغيل محطتين عادةً، وغالباً ثلاث محطات. ومن ثم، فإن موقع الحدث الأول، والمخاطر، وتقديرات وقت التحذير، تعتمد على معلومات من محطات متعددة، مما يوفر تقديراً أكثر دقة للموقع وقدره من استخدام محطة واحدة.

يوضح الاختبار أن تقديرات القدر متاحة لـ **56%** من الزلازل في وقت وصول **S** مع متوسط خطأ في القدر يبلغ **0.44** وحدة قدر، الشكل **3.6A**. في غضون 5 ثوانٍ، تتوفر تقديرات القدر لـ **97%** من الأحداث، وينخفض متوسط الخطأ إلى **0.33 وحدة قدر**. ويبين الشكل السابق - **B** الخطأ في تقديرات **PGA** كدالة للوقت. حيث يجري تقدير **PGA** في كل محطة على بعد **100 km** من الحدث باستخدام مقدار **ElarmS** المتوفر وموقعه وعلاقات التوهين الموضحة أعلاه. يُحسب الخطأ في تقدير **PGA** بالطريقة المعتادة: وهو اللوغاريتم الطبيعي لـ **PGA** المتوقع مطروحاً منه اللوغاريتم الطبيعي لـ **PGA** المرصود للحدث.





وفي وقت وصول **S**، كان متوسط الخطأ المطلق هو **1.08**. وينخفض إلى **1.00** خلال **5 ثوانٍ**، و**0.98** خلال **10 ثوانٍ**، ويصل إلى **0.95** خلال **15 ثانية**. عند استخدام القدر الصحيح في علاقات التوهين (ومن ثم إزالة الخطأ في تقدير قدر **ElarmS**)، يكون الخطأ أقل قليلاً فقط: **0.89**. الخطأ في **PGA** بقيمة **1** يعادل الفرق بين كثافة **Mercalli** المعدلة (**MMI**) من **IV** إلى **V** أو بدلاً من ذلك من **VIII** إلى **X**.

مع تقدم الوقت أثناء وقوع الزلزال، تسجل أقرب المحطات **PGA** الخاصة بها ويجري تضمين هذه المعلومات في التنبؤ للمحطات الموجودة على مسافات أكبر من مركز الزلزال. يظهر في الشكل السابق - **C** الخطأ في تنبؤ **PGA** بمجرد دمج مراقبات **PGA** من المحطات القريبة. عند **5 ثوانٍ**، يبلغ متوسط الخطأ **1.02**، وهو ما يشبه عندما لا يضمن ملاحظات **PGA**، ولكنه ينخفض إلى **0.85** عند **10 ثوانٍ** و**0.82** عند **15 ثانية**، وهو أفضل قليلاً من مجرد استخدام تقديرات القدر وحدها. الاستخدام الأكثر أهمية لملاحظات **PGA** هو إزالة القيم المتطرفة، أي الحالات التي يكون فيها التقدير القائم على القدر مرتفعاً جداً أو منخفضاً.





• توزيعات وقت التحذير لشمال كاليفورنيا

بعد تقييم توقيت التحذيرات ودقتها في جنوب كاليفورنيا، يتطلع الباحثون إلى التوزيع المحتمل لأوقات التحذير في شمال كاليفورنيا في حالة تنفيذ منهجية **ElarmS** باستخدام الشبكة الزلزالية الحالية. استخدم الباحثون مجموعة من سيناريوهات الزلازل المحتملة لشمال كاليفورنيا التي حددتها مجموعة العمل المعنية باحتمالات الزلازل في كاليفورنيا (2003). يرتبط كل سيناريو من سيناريوهات الزلازل باحتمالية حدوثه بحلول عام 2032، مما يسمح بتحديد توزيعات وقت التحذير الاحتمالية لأي موقع في المنطقة.

لحساب أوقات التحذير، نحدد «وقت التنبه» الذي يهدف إلى تمثيل الوقت الذي تتوفر فيه معلومات كافية حول الزلزال للمستخدمين لاتخاذ الإجراءات اللازمة. خلال أي زلزال، ستزداد دقة معلومات التحذير بمرور الوقت وسيقوم مستخدمون محددون بتحديد مستوى اليقين المطلوب لإجراءات التخفيف الخاصة بهم. هنا، يختار الباحثون عتبة واحدة بناءً على دقة التحذير ويستخدمون النقطة الزمنية التي تتوفر فيها بيانات الموجة **P** لمدة **4 ثوانٍ** في أربع محطات زلزالية. يمكن تعريف هذا على أنه وقت التنبه ويمثل الوقت الذي سيكون فيه متوسط الخطأ في تقدير القدر ~ 0.5 وحدة قدر بناءً على الاختبارات التي أجريت في جنوب كاليفورنيا واليابان.

وقت التحذير هو الفرق بين وقت التنبه والوقت المقدر لذروة اهتزاز الأرض في موقع معين. بالنسبة لوقت وصول ذروة اهتزاز الأرض كدالة للمسافة المركزية،





يُستخدم منحني وقت وصول الموجة S إلى مسافة **150 كم** ثم حركة ثابتة تبلغ **3.55 كم/ثانية** بناءً على التحرك المرصود لذروة اهتزاز الأرض في كاليفورنيا.

تحسب أوقات التحذير لإجمالي **4070 مركزاً** للزلازل. وتوزع مراكز الزلازل هذه على مسافة كيلومتر واحد على طول الصدوع التي جرى تحديدها على أنها من المرجح أن تسبب زلازل مدمرة في شمال كاليفورنيا من قبل مجموعة العمل المعنية باحتمالات الزلازل في كاليفورنيا (2003).

حددت الدراسة سبعة أنظمة خطأ، كل منها يحوي على جزء تمزق واحد أو أكثر، كما هو موضح في الشكل الآتي، والتي يمكن أن تتفجر من تلقاء نفسها أو مع الأجزاء المجاورة. في المجمل، جرى تحديد **35 سيناريو** لتمزق الزلازل وقدرت احتمال حدوثها خلال **30 عاماً** لكل منها. ويبلغ الاحتمال الإجمالي لحدوث واحد أو أكثر من سيناريوهات الزلازل هذه (التي تتراوح قوتها من **5.8** إلى **7.9**) قبل عام **2032** هو **84%**.

ضمن **SFBA**، الصدوع الأكثر احتمالاً للتمزق هي صدع سان أندرياس وصدع **هايوارد-رودجرز كريك** مع احتمالات إنتاج زلزال بقوة **6.7** أو أكبر بنسبة **21%** و **27%** على التوالي. يبلغ الاحتمال الإجمالي لواحد أو أكثر من الزلازل بقوة **6.7** أو أكثر خلال الثلاثين عاماً القادمة (من **2003** إلى **2032**) في **62% SFBA**.

يتضمن كل من سيناريوهات الزلازل هذه تمزقاً عبر مستوى الصدع المحدود. يعتمد وقت التحذير في زلزال معين على الموقع المركزي حيث يبدأ التمزق.

لا يعرف الباحثون نقطة البدء المحتملة للسيناريوهات الخمسة والثلاثين؛ لذلك، فإننا نستوعب حالة عدم اليقين في الموقع المركزي من خلال توزيع مراكز الزلازل على فترات تبلغ كيلومتراً واحداً على طول كل صدع. يجري تعيين

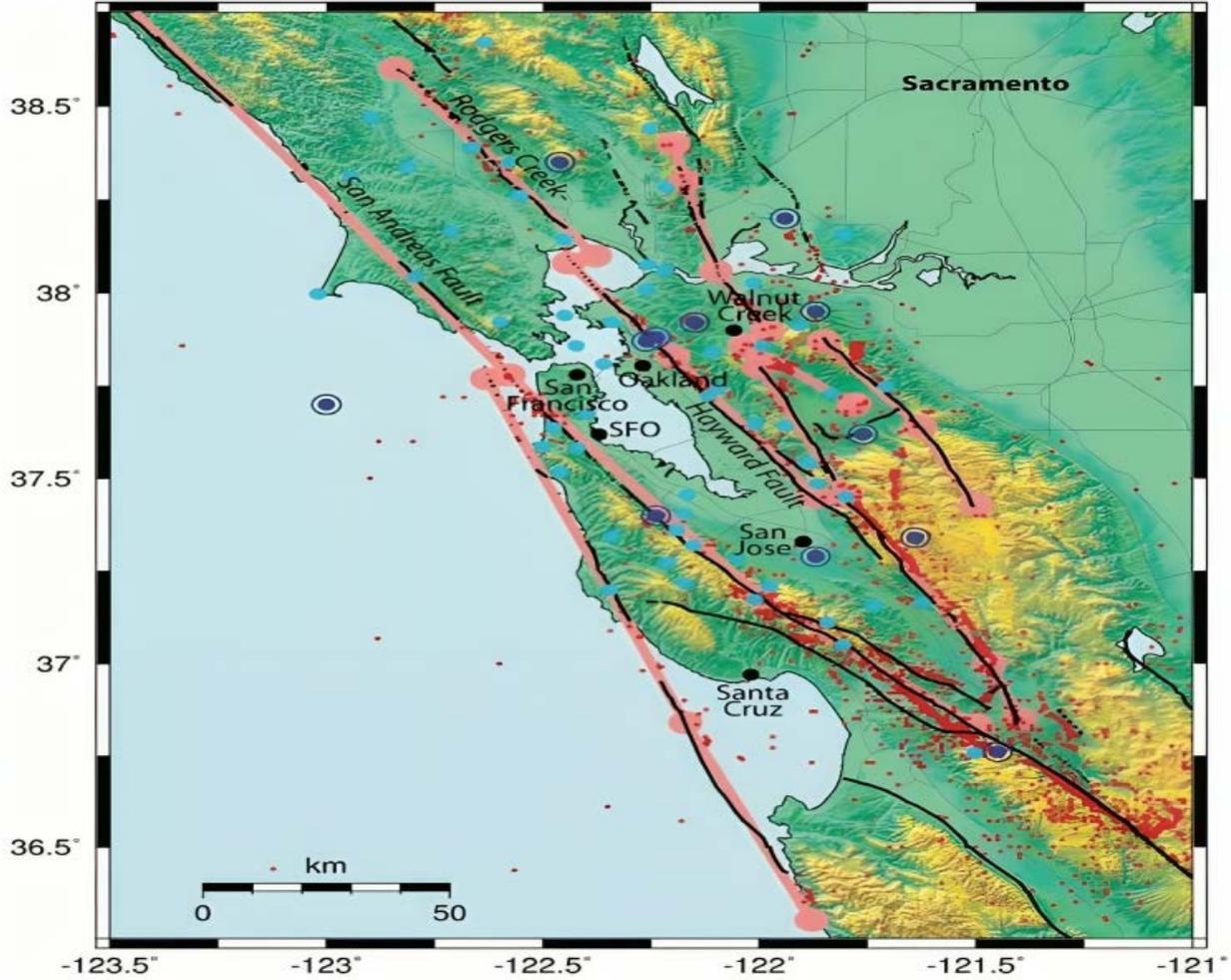




احتمال حدوث زلزال مع كل موقع مركزي ضمن سيناريو تمزق واحد على قدم المساواة، والاحتمال الإجمالي لجميع مراكز الزلزال يساوي احتمال السيناريو. بالنظر إلى مركز الزلزال، فإنه يعتمد وقت التنبه على المواقع النسبية لمحطات رصد الزلازل للكشف عن وصول الموجة **P**. يجري تشغيل عدة آلاف من محطات رصد الزلازل في شمال كاليفورنيا بواسطة شبكة كاليفورنيا للزلازل المتكاملة (**CISN**)، والتي تتكون من شبكات زلزالية متعددة ومتكاملة (انظر الموقع: <http://www.cisn.org>).

تتطلب منهجية **ElarmS** أشكال موجية زلزالية مستمرة مسجلة بواسطة أجهزة ذات حساسية ترددية واسعة، أي محطات النطاق العريض المستمرة. تشغل مثل هذه الأجهزة من قبل جامعة كاليفورنيا بيركلي، التي تساهم بشبكة مكونة من **24** محطة، كل منها مزود بمقاييس زلازل لسرعة النطاق العريض ومقياس تسارع. هيئة المسح الجيولوجي، التي تشغل ما يقرب من **100** مقياس تسارع، يقع معظمها في منطقة **SFBA**، و**15** مقياسًا للزلازل ذات النطاق العريض. في المجمل، هناك ما يقرب من **140** محطة زلزالية عبر شمال كاليفورنيا والتي يمكن استخدامها في نظام الإنذار المبكر، كما في الشكل الآتي.





خريطة لمنطقة خليج سان فرانسيسكو (SFBA) توضح العيوب المعينة (خطوط سوداء غامقة) وموقع الزلازل التي تزيد قوتها عن 3 منذ بدء التسجيل (النقاط الحمراء). تظهر محطات النطاق العريض المستمرة الحالية التي تديرها جامعة كاليفورنيا في بيركلي (باللون الأزرق الداكن) وهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (باللون الأزرق الفاتح) مع دوائر لأجهزة قياس الزلازل لسرعة النطاق العريض ونقاط لمقاييس التسارع. تظهر أجزاء الصدع التي حدها الفريق العامل المعني باحتمالات حدوث زلزال في كاليفورنيا (2003) بنقاط وردية في نهايات الأجزاء المرتبطة بخطوط وردية عريضة. «نقاط التحذير» الست المدرجة تظهر 3.8 و3.9 كنقاط سوداء.





يحسب وقت التنبيه لكل مركز زلزال على أنه الوقت الذي تتوفر فيه 4 ثوانٍ من بيانات الموجة P في أقرب 4 محطات نطاق عريض مستمرة بالإضافة إلى قياس ثابت عن بعد وتأخير معالجة قدره 4.5 ثانية. ويمثل تأخير قدره 4.5 ثانية إرسال بيانات الشكل الموجي من كل محطة إلى أحد مراكز تشغيل الشبكة، ووقت المعالجة، وإرسال التحذير إلى مجتمع المستخدمين. ونظراً للبنية التحتية الزلزالية الحالية في شمال كاليفورنيا، فإن التأخير الأكثر أهمية هو تجميع البيانات قبل إرسالها من كل محطة.

يقدم تأخير قدره 2.5 ثانية للحزم، وهو ما يمثل التأخير في أبطأ المحطات الموجودة. نضيف ثانية واحدة للإرسال إلى مركز المعالجة وثانية واحدة لإرسال رسالة التحذير. زمن معالجة البيانات لا يكاد يذكر. ومن ثم فإن تقديرات وقت التحذير تمثل ما هو ممكن باستخدام أجهزة الشبكة الزلزالية الموجودة. ويمكن تحسينها من خلال تحديث أنظمة القياس والمعالجة عن بعد وكذلك بالإضافة إلى إضافة محطات رصد الزلازل.

وتظهر في الشكل السابق دالة الكثافة الاحتمالية لوقت التحذير (WTPDF) لمدينة سان فرانسيسكو. WTPDF هذا مخصص للمركز المدني؛ ومع ذلك، فإنه لا يختلف بشكل كبير عن بقية المدينة.

بالنسبة لجميع الزلازل المدمرة المحتملة في المنطقة، يمكن أن تتلقى سان فرانسيسكو تحذيرات تتراوح من 77 ثانية إلى 8- ثانية. حيث إن أوقات التحذير السلبية تعني عدم وجود تحذير ممكن.

أوقات التحذير الأكثر احتمالاً هي أقل من 25 ثانية؛ ومع ذلك، فإن WTPDF له ذيل طويل بسبب صدع سان أندرياس. وفي تكرار لزلزال عام 1906، قد



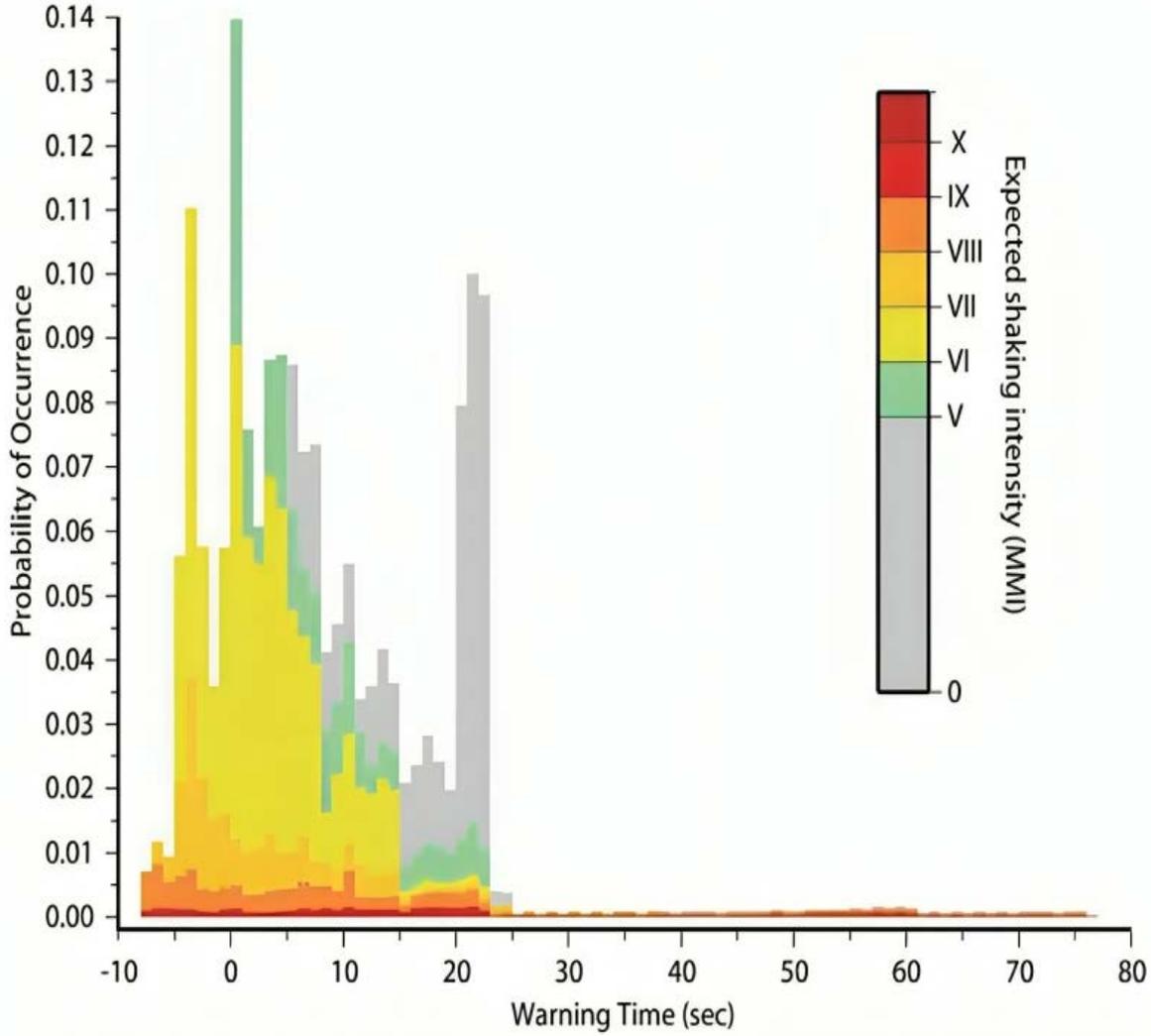


يتمزق جزء من الصدع يبلغ طوله **450 كيلومترًا**. إذا انتشر الحدث قبالة البوابة الذهبية، فلن يكون هناك أي تحذير يذكر لسان فرانسيسكو.

ومع ذلك، بافتراض أنه من المحتمل أيضًا أن يحدث التمزق في أي مكان على طول الصدع، فمن المرجح أن يكون مركز الزلزال على مسافة كبيرة من سان فرانسيسكو ويمكن أن يكون هناك تحذير بعشرات الثواني لسيناريو الزلزال الأكثر ضررًا. تجدر الإشارة إلى أن التمزق الذي حدث **عام 1906** ربما حدث بالفعل خارج البوابة الذهبية. ما إذا كان هذا يعني أن التمزق المستقبلي سيحدث في الموقع غير معروف نفسه.

بالإضافة إلى أوقات التحذير لكل زلزال، يقوم الباحثون أيضًا بتقدير الشدة المحتملة لاهتزاز الأرض عند نقطة التحذير، أي المركز المدني كما في حالة الشكل الآتي. هذه الشدة مستمدة من حسابات سيناريو **ShakeMap** (مجموعة العمل المعنية باحتمالات الزلازل في كاليفورنيا **2003**). تمثل المناطق الرمادية في الشكل الآتي الزلازل التي تكون شدة الاهتزاز فيها في المركز المدني أقل من **V** على مقياس **MMI** (**ريختر، 1958**) ومن غير المرجح أن يكون هناك ضرر. فوق **MMI V**، يزداد الضرر المحتمل مع شدة الاهتزاز من الضوء (**V**: تعني إزاحة الأجسام غير المستقرة)، إلى القوي (**VII**: الأثاث المكسور والأضرار التي لحقت بالبناء)، إلى العنيف (**IX**: البناء الذي تعرض لأضرار بالغة أو تدميره، إزاحة الإطارات من الأساس).





وظيفة كثافة احتمالية وقت التحذير (WTPDF) للمركز المدني في سان فرانسيسكو (37.78 درجة شمالاً، 122.42 درجة غرباً). تتراوح أوقات التحذير لجميع الزلازل المحتملة من -8 ثانية إلى 77 ثانية، وأوقات التحذير السلبية تعني عدم وجود تحذير ممكن. تقع الزلازل في صناديق مدتها ثانية واحدة ويظهر المحور الرأسي الاحتمال الإجمالي لحدوث زلزال واحد أو أكثر قبل عام 2032 مع وقت تحذير محدد. يمثل اللون الكثافة المقدره لاهتزاز الأرض لكل حدث. من غير المحتمل حدوث ضرر لـ $MMI < V$ (رمادي)؛ $MMI > IX$ يعني الاهتزاز العنيف الذي من المحتمل أن يسبب أضراراً جسيمة للمباني (الأحمر).





وفي حالة **WTPDF** لسان فرانسيسكو، الشكل السابق، يشتمل الذيل الطويل لأوقات التحذير الكبيرة على جزء كبير من سيناريوهات الزلازل التي ستسبب هزات أرضية عنيفة ($MMI > IX$).

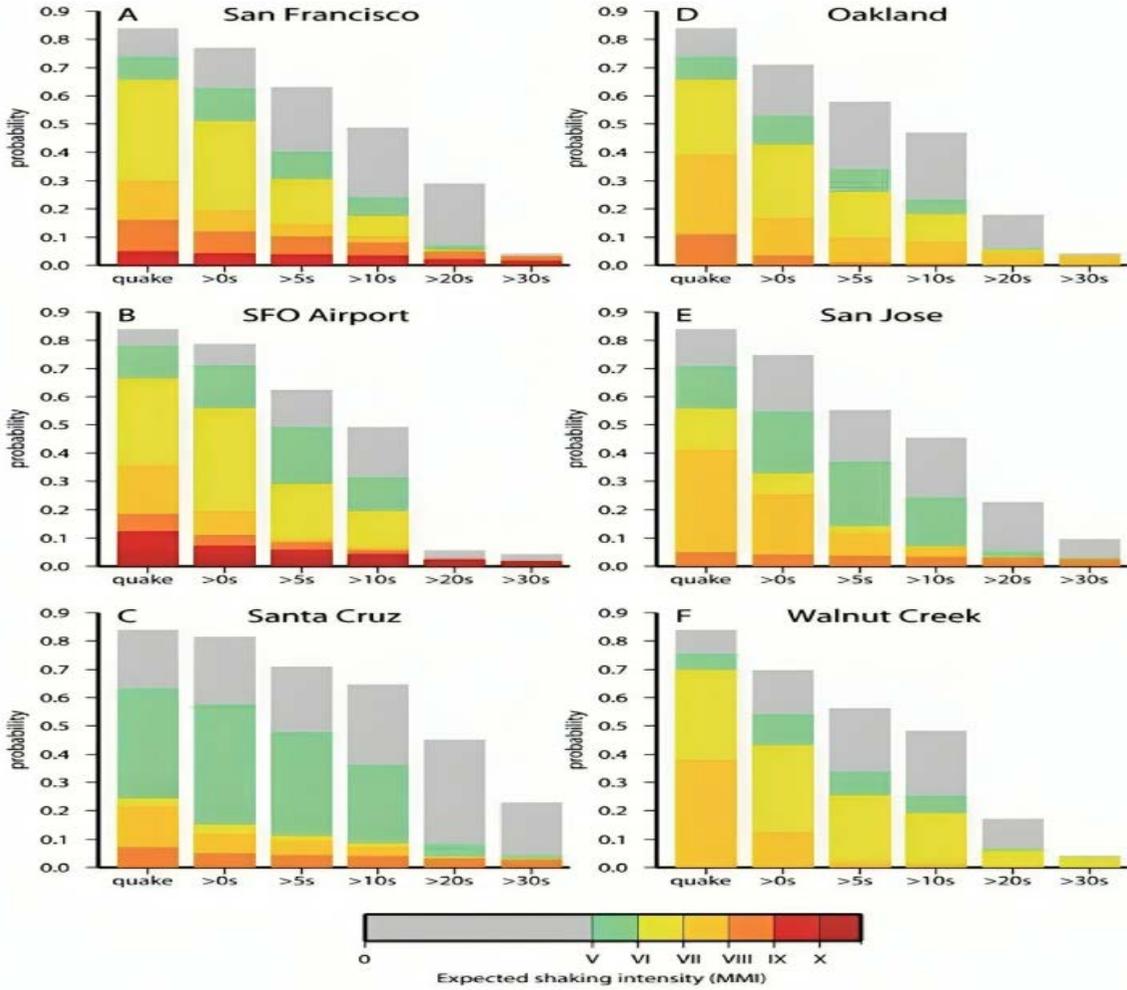
وذلك لأن شدة اهتزاز الأرض في زلزال معين تعتمد على أقرب مسافة إلى تمزق الصدع، في حين يعتمد وقت التحذير على المسافة إلى مركز الزلزال. تعتبر تقديرات وقت التحذير لدينا متحفظة من حيث إنها تمثل وقت سفر طاقة القص مباشرة من مركز الزلزال إلى نقطة التحذير. قد لا يحدث الوقت الحقيقي لذروة اهتزاز الأرض حتى ينتشر التمزق على طول الصدع إلى أقرب نقطة، والتي تكون عادةً أقل من سرعة موجة القص، ثم من الصدع إلى نقطة التحذير عند سرعة موجة القص.

يظهر في الشكل الآتي تمثيلات مبسطة لـ **WTPDF** لستة مواقع حول **SFBA**. يتوفر **WTPDF** الكامل لهذه المواقع والمدن والمواقع الأخرى ذات الأهمية الهندسية على الموقع: <http://www.ElarmS.org>.





أنظمة الانذار المبكر للزلازل



وظائف كثافة احتمالية وقت التحذير المبكرة (WTPDF) لستة مواقع حول SFBA. في كل لوحة، يُظهر العمود الأول الاحتمالية الإجمالية لجميع الزلازل المحتملة في المنطقة قبل عام 2032 (84%) والكثافة المتوقعة لاهتزاز الأرض. تُظهر الأعمدة المتبقية احتمالية حدوث زلزال حيث يمكن توفير إنذار أكثر من 0 و 5 و 10 و 20 و 30 ثانية، وتوزيع شدة اهتزاز الأرض لتلك الأحداث. تظهر المواقع الستة في الشكل 3.7. (A) مدينة سان فرانسيسكو (37.78 درجة شمالاً، 122.42 درجة غرباً). (B) مطار سان فرانسيسكو الدولي، (C) SFO (37.62 درجة شمالاً، 122.37 درجة غرباً). (D) مدينة أوكلاهاند (37.805 درجة شمالاً، 122.270 درجة غرباً). (E) مدينة سان خوسيه (37.33 درجة غرباً). (F) مدينة وولنت كريك (37.90 درجة شمالاً، 122.06 درجة غرباً).





يوضح الشكل السابق (A)) أن هناك احتمالاً بنسبة 74% لحدوث زلزال واحد أو أكثر من شأنه أن يسبب بعض الأضرار ($MMI \geq V$) في سان فرانسيسكو بحلول عام 2032، واحتمال بنسبة 63% لوقوع حدث مدمر يمكن أن يتوفر تحذير بشأنه. هناك احتمال بنسبة 5% لحدوث زلزال يسبب اهتزازاً عنيفاً للأرض ($MMI \geq IX$)، واحتمال بنسبة 3% لحدوث زلزال يمكن أن يتوفر فيه تحذير لمدة تزيد عن 10 ثوانٍ. ولذلك فمن المرجح أن يتوفر تحذير لأكثر من 10 ثوانٍ قبل اهتزاز الأرض العنيف في المدينة. يشبه WTPDF مطار سان فرانسيسكو الدولي (الشكل السابق B)) ذلك الخاص بالمدينة، باستثناء أن شدة اهتزاز الأرض يمكن أن تكون أكبر نظراً لقربها من صدع سان أندرياس.

تحدث أشد الزلازل خطورة في مدن إيست باي في منطقة هايوارد رودجرز كريك فالت. إن قربها من مدن مثل أوكلاند يؤدي إلى تقليل أوقات التحذير، ولكن أيضاً كثافته أقل بسبب قصر طول الصدع.

لا يزال من الأرجح أن يتوفر تحذير بشأن زلزال مدمر، الشكل (D). معظم المخاطر التي تتعرض لها سان خوسيه تأتي من صدع سان أندرياس. وكما هو الحال مع سان فرانسيسكو، فإن هذا يعني أن هناك احتمالاً كبيراً بأوقات تحذيرية كبيرة للزلازل الأكثر ضرراً. في حين أن هناك احتمال 5% لحدوث سبب $MMI VIII$ في سان خوسيه، هناك احتمال 3% لحدوث يمكن أن يكون هناك تحذير أكثر من 20 ثانية الشكل السابق (E).

في 17 أكتوبر 1989، تعرض زلزال لوما بريتا ($M_w 6.9$)، أقرب مدينة إلى مركز الزلزال، سانتا كروز، لـ $MMI VIII$. هناك احتمال بنسبة 7% لشدة مماثلة من الهزات الأرضية بحلول عام 2032، وفرصة بنسبة 3% لحدوث





هزات أرضية مماثلة يمكن أن يتوفر بشأنها تحذير أكثر من 30 ثانية الشكل السابق (C).

أخيراً، من المرجح أن تتعرض المناطق الحضرية سريعة النمو شرق بيركلي هيلز، مثل وولنت كريك، لهزات أرضية مدمرة مثل سان فرانسيسكو، مع أن الأحداث الأكثر خطورة تكون أقل شدة الشكل (F).

كما هو الحال بالنسبة لجميع المواقع في SFBA، يمكن أن تتلقى كريك فالت تحذيراً قبل أن يبدأ اهتزاز الأرض بالنسبة لغالبية الزلازل المدمرة.

• توقعات التحذير من الزلازل

اقترح نظام الإنذار المبكر لسان فرانسيسكو لأول مرة من قبل كوبر (1868)، الذي اقترح أن كابلات التلغراف التي تشع من المدينة يمكن أن ترسل تحذيراً قبل اهتزاز الأرض. وأشار أيضاً إلى أن هذا لن ينجح إذا كان مركز «الصدمة» قريباً من المدينة، لكنه قدر حدوث مثل هذا السيناريو بأقل من 1% من الوقت. ولم تكن تقديراته بعيدة عن تقديراتنا الحالية اليوم.

وخلصت دراسة حديثة أجراها هيتون (1985)، باستخدام التوزيع النظري للزلازل في جنوب كاليفورنيا، إلى أنه يمكن أن يكون هناك أكثر من دقيقة تحذير من الزلازل الأكبر والأكثر ضرراً.

هنا، نتوصل إلى نتيجة مماثلة باستخدام مجموعة الزلازل الماضية في جنوب كاليفورنيا والزلازل المحتملة في المستقبل ومحطات الزلازل الموجودة في شمال كاليفورنيا. وتعمل حالياً أنظمة الإنذار المبكر النشطة في المكسيك واليابان





وتايوان وتركيا. وهي تستخدم رسائل التحذير الخاصة بها حالياً من قبل أنظمة النقل مثل أنظمة السكك الحديدية والمترو، بالإضافة إلى الصناعات الخاصة، بما في ذلك مصانع البناء والتصنيع والكيماويات.

كما أنها تستخدم من قبل شركات المرافق لإغلاق محطات التوليد والسدود، وموظفي الاستجابة للطوارئ لبدء العمل قبل اهتزاز الأرض. بالإضافة إلى ذلك، تتلقى المدارس تحذيرات تسمح للأطفال بالاحتماء تحت المكاتب، وتغلق الوحدات السكنية الغاز تلقائياً وتفتح الأبواب والنوافذ، ويتم إخلاء المجمعات بكاملها.

العديد من هذه التطبيقات ستكون مناسبة أيضاً في كاليفورنيا. يمكن حساب **WTPDF** للموقع المحدد لأي مستخدم واستخدامه لتحديد التكلفة والعائد من تنفيذ استجابة تلقائية لرسائل التحذير.

إن خدمات الإنذار المبكر ليست حلاً سحرياً للتخفيف من مخاطر الزلازل. في حين أن خدمات الإنذار المبكر لا يمكنها تحذير الجميع قبل جميع أحداث الهزات الأرضية، إلا أنها يمكن أن تقدم تحذيراً للعديد من الأشخاص المتضررين في معظم الأوقات. لا يوجد نهج مثالي لتخفيف المخاطر الطبيعية.

تهدف قوانين البناء إلى منع انهيار معظم الهياكل في معظم الزلازل. إذا كان تخفيف المخاطر الطبيعية هو هدفنا، فمن المهم التأكد من أننا نتساءل باستمرار عما يمكن القيام به، وما هي التقنيات الجديدة التي يمكن تطبيقها.

وكما أظهرت كارثة تسونامي التي وقعت في السادس والعشرين من **ديسمبر 2004** بكل وضوح، فإن الرضا عن النفس ليس خياراً.





أنظمة الإنذار المبكر (التجربة اليابانية)

تسببت الزلازل في أسوأ الكوارث الطبيعية بشكل متكرر. وفي القرن الحادي والعشرين وحده، وقع عدد من الزلازل الكارثية التي دمرت حياة الإنسان والبيئات. وقد أسفرت الزلازل السبعة الأكثر دموية التي حدثت في القرن الحادي والعشرين عن مقتل أكثر من **10000 شخص**.

يتمنى الجمهور إمكانية التنبؤ بالزلازل المدمرة مسبقاً. هناك العديد من شبكات الأجهزة الزلزالية بمقاييس مختلفة، والتي تم تركيبها في محاولة لرصد الظواهر السابقة للزلازل حول العالم. ومع ذلك، في الوقت الحاضر، ليس من الممكن التنبؤ بموقع ووقت وقدر الزلزال قبل حدوثه.

من ناحية أخرى، بمجرد حدوث زلزال، يمكن لشبكة مراقبة واسعة النطاق في الوقت الفعلي مثبتة لمراقبة النشاط الزلزالي في منطقة واسعة اكتشافه، ونظام الإنذار المبكر بالزلزال (EEW) (يشار إليه باسم الشبكة الكبيرة) يمكن لنظام الإنذار المبكر من الزلازل فيما بعد إصدار تنبيه للمناطق المتضررة من خلال وسائل الإعلام المختلفة قبل ثوانٍ من وصول الهزة الأرضية القوية.

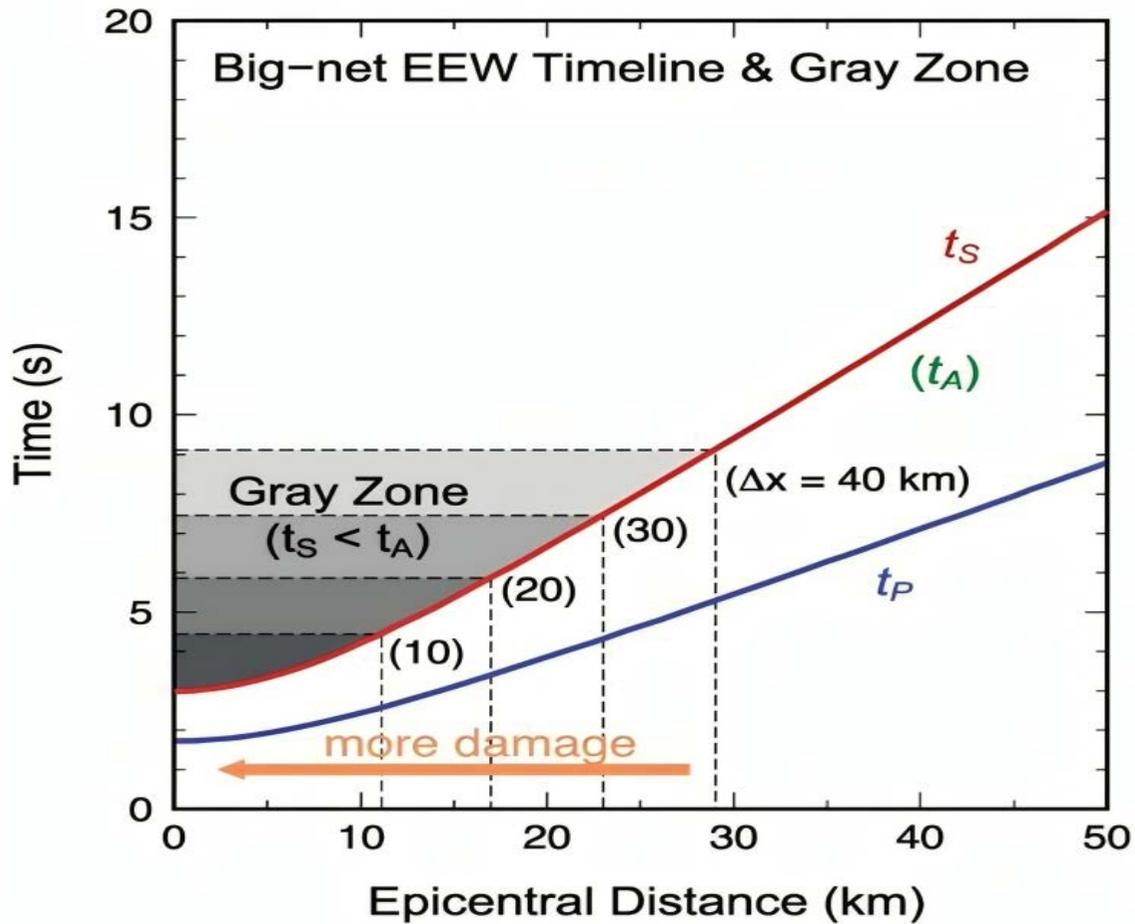
وفي الوقت الحاضر، توجد أنظمة الإنذار المبكر من الزلازل ذات شبكات كبيرة عاملة في العديد من البلدان. يتكون النظام في اليابان الذي بدأت وكالة الأرصاد الجوية اليابانية (JMA) تشغيله في عام **2007** من أكثر من **4000 محطة** مساهمة، مع فاصل نموذجي للمحطة يبلغ نحو **20 كيلومتراً** فوق البلاد،





وله السجل الأكثر شمولاً لأداء الإنذار المبكر من الزلازل.

قد يتوقع المستخدمون النهائيون/المستلمون في الأماكن العامة تلقي تنبيه من نظام الشبكة الكبيرة قبل حدوث اهتزاز قوي للأرض، ومن ثم يكونون قادرين على اتخاذ إجراءات فعالة. وهنا، يجب أن يكونوا على دراية بالجدول الزمني لتلقي التنبيه ووصول الحركة الأرضية الفعلية إلى مواقعهم، وهو ما جرى توضيحه بالنسبة لحدوث الزلزال في الشكل الآتي.



مخطط زمني لشبكة الإنذار المبكر من الزلازل الكبيرة لوصول اهتزاز قوي ومناطق رمادية لفترات زمنية





مختلفة للمحطات. جرى توضيح هذا المثال لحدث يقع على عمق 10 كم. يُظهر المحور الرأسي الوقت (الأوقات) المنقضية من وقت منشأ الزلزال، والمحور الأفقي مسافة مركز الزلزال (D، بالكيلومترات).

بمجرد حدوث زلزال في المنطقة المغطاة بشبكة رصد الزلازل الكثيفة، يكتشف نظام الإنذار المبكر من الزلازل موجات P من الزلزال ويحدد المعالم الأولية (مركز الانخفاض، والقدّر، ووقت الأصل) باستخدام البيانات في ثلاث محطات أو أكثر.

إذا تجاوزت الشدة المقدرة مستوى معيناً، فقد يصدر النظام تنبيهاً للمناطق المتضررة. تجدر الإشارة إلى أن وقت التحذير، وهو الفاصل الزمني بين إصدار التنبيه عند t_A ووصول الحركة الأرضية الفعلية بواسطة الموجات S عند t_S ، يجب أن يكون كافياً للمستلمين لاتخاذ إجراءات فعالة.

ومع ذلك، قد لا يصل تنبيه كبير من نظام الإنذار المبكر من الزلازل الشبكة إلى المناطق الواقعة ضمن مسافة مركزية معينة (D) قبل وصول اهتزاز أرضي قوي. وهذا ما يسمى «المنطقة الرمادية» في نظام الشبكة الكبيرة. يعتمد قدر المنطقة الرمادية على تباعد محطة الشبكة (Δx) ووقت معالجة النظام.

الشعور بهزات أرضية قوية حتى في منطقة العاصمة طوكيو المزدحمة (أي ما يعادل I_{JMA} أكثر من +5)، والتي تبعد أكثر من 300 كم عن مركز الزلزال. لم يكن عدد الضحايا الناجم عن الزلزال كبيراً مقارنة بالزلازل الأخرى ذات القدر المماثل، مثل زلزال المحيط الهندي عام 2004، مع المستويات العالية جداً لتسارع الأرض (أي ذروة التسارع التي تزيد عن 2 غرام في بعض المواقع؛ فورومورا وآخرون. (2011)) بسبب قوانين البناء عالية المستوى والاستعدادات





الهندسية المتقدمة. لاحظ هنا أنه منذ صدوره في عام 1950، جرى تحديث قانون معايير البناء في اليابان في كل مرة بعد وقوع زلزال كبير.

فيما يتعلق بمعيار مقاومة الزلازل في اليابان، تم إجراء تعديل رئيسي في عام 1981 (يسمى «معيار مقاومة الزلازل الجديد») بينما أمكن إجراء المزيد من المراجعات للمنازل الخشبية في عام 2000، بناءً على تحليلات الأضرار التي لحقت بغريت هانشين Mw6.8 عام 1995 (أو كوبي).

عزت العديد من البلدان الأخرى انخفاض عدد الوفيات الناجمة عن زلزال توهوكو-أوكي Mw9 إلى حد كبير إلى نظام الإنذار المبكر من الزلازل الموسع على مستوى البلاد، وتخطط حالياً لتثبيت أنظمة مراقبة مكثفة في الوقت الفعلي وأنظمة الإنذار المبكر من الزلازل خاصة بها.

كان هناك عدد من الندوات وورش العمل حول البحث والتطوير (R&D) في نظام الإنذار المبكر من الزلازل بما في ذلك جلسة دولية بعنوان «تطورات الإنذار المبكر بالزلازل حول العالم» التي عقدت في اجتماع اتحاد علوم الأرض الياباني (JpGU) لعام 2016 بالاشتراك مع الاتحاد الجيوفيزيائي الأمريكي (AGU) («الجلسة المشتركة لعام 2016 بين JpGU و AGU حول EEW» فيما يلي؛ راجع http://www.jpгу.org/meeting_e2016/session_list/detail/S-SS01.html لتعزيز التواصل في هذا المسعى بين البلدان. ركزت معظم العروض التقديمية في ورش العمل/الندوات على تحسين تغطية المحطات وطرائق تحليل البيانات لأنظمة الإنذار المبكر من الزلازل ذات الشبكات الكبيرة.

ومع ذلك، فإن أنظمة الإنذار المبكر من الزلازل تكون مفيدة فقط إذا جرى





تأمين قوة الهياكل ومرونة العمليات في المواقع الفردية ضد الاهتزازات القوية. ويسمي الباحثون هذا «التحضيرات الفعالة للموقع» للسلامة من الزلازل.

يوضح الشكل الآتي تسليم تنبيه الإنذار المبكر من الزلازل إلى المناطق التي قد تتعرض لهزة قوية. قد يتمكن الناس من حماية أنفسهم في ثوان. قد يجري إيقاف تشغيل الطاقة لإيقاف العمليات. قد لا تنهار المباني إذا أمكن بناؤها وفقاً لقواعد بناء عالية المستوى أو جرى تحديثها بشكل مناسب.

كما يوضح الرسم التوضيحي أيضاً أن زلزالاً قوياً قد يضرب منشأة عالية التقنية ويسبب أضراراً جسيمة للآلات إذا لم يكن هناك نظام عزل زلزالي أسفل المبنى. في حالة زلزال توهوكو-أوكي عام 2011، كانت الاستعدادات للسلامة الزلزالية في المواقع الفردية وتشغيل نظام الإنذار المبكر من الزلازل الواسع النطاق مفيدة جداً في تخفيف الأضرار الناتجة عن الاهتزاز.

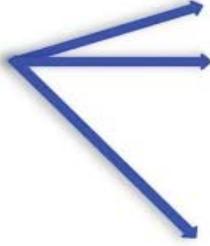
كما هو مذكور أعلاه، جرى تحديث معيار مقاومة الزلازل بشكل كبير في عامي 1981 و2000. وجرى بناء المباني الجديدة وفقاً لمعايير البناء المحدثة بينما حدثت المباني القديمة وفقاً لذلك. يعد الإعداد الفعال للموقع ضرورياً جداً للإنذار المبكر من الزلازل. وبدون هذه الاستعدادات، فإن توقعات الجمهور بشأن الإنذار المبكر من الزلازل ستكون مماثلة لتلك التي كانت تتنبأ بالزلازل في الماضي.





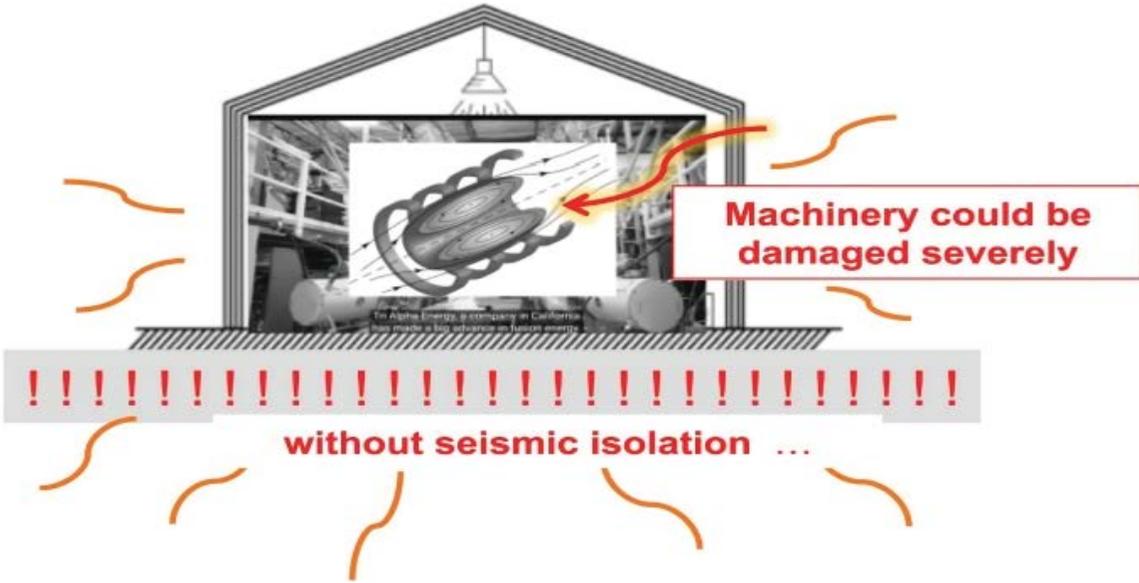
Responses in affected areas

EEW Alert



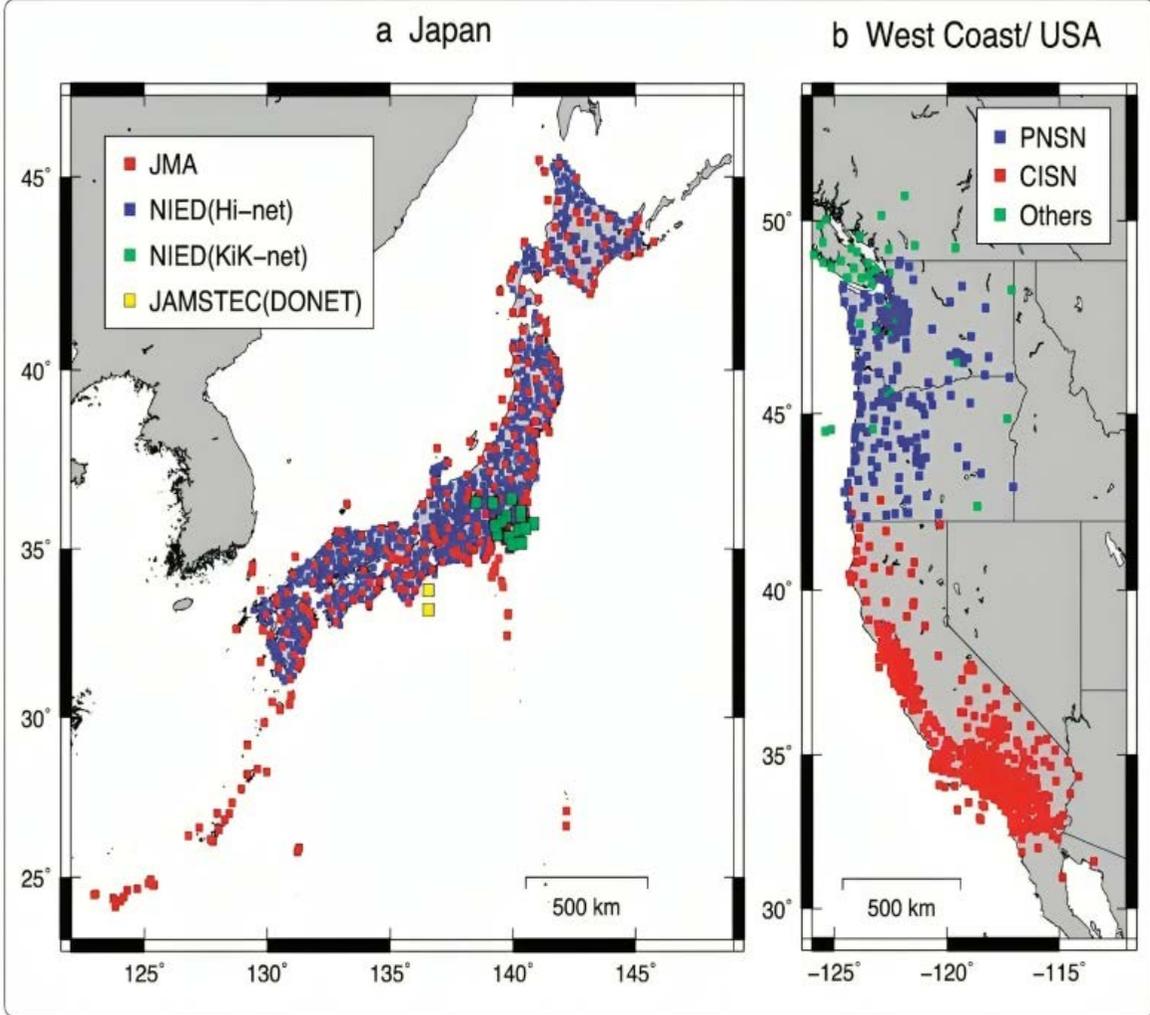
- Power off
- People may be able to protect themselves.
- Buildings will not collapse if built/retrofitted with a high standard building code.
-
-

High-Tech Facility



رسم توضيحي تخطيطي للاستجابات للإنذار المبكر من الزلازل بما في ذلك منشأة افتراضية عالية التقنية. عند تلقي تنبيه، قد يجري إيقاف تشغيل الطاقة. قد يكون الناس قادرين على حماية أنفسهم وقد لا تنهار المباني إذا جرى بناؤها أو تحديثها باستخدام قواعد بناء عالية المستوى. ومع ذلك، في منشأة عالية التقنية، بدون نظام عزل زلزالي تحتها، يمكن أن يؤدي الاهتزاز القوي إلى إصابة الآلات المعرضة للخطر بشكل مباشر والتسبب في أضرار جسيمة لها. على سبيل المثال، الآلات التي تعمل تحت الجهد العالي والتيارات العالية قد لا تتوقف عن العمل على الفور بعد انقطاع التيار الكهربائي.





توزيع المحطات لتشغيل نظام الإنذار المبكر من الزلازل: محطات الشبكة اليابانية بواسطة JMA و NIED (Hi-net وجزء من KiK-net)، و 4000 (> JAMSTEC (DONET)). هنا، تم تضمين 30 بيانات لمحطة بئر KiK-net حول منطقة كانتو (Iwakiri et al. 2012)؛ ب محطات الشبكة بواسطة CISN و PNSN وغيرها التي تساهم في ShakeAlert في منطقة الساحل الغربي للولايات المتحدة الأمريكية (في مرحلة الاختبار التجريبي مع ~ 830 محطة، اعتباراً من يوليو 2017)

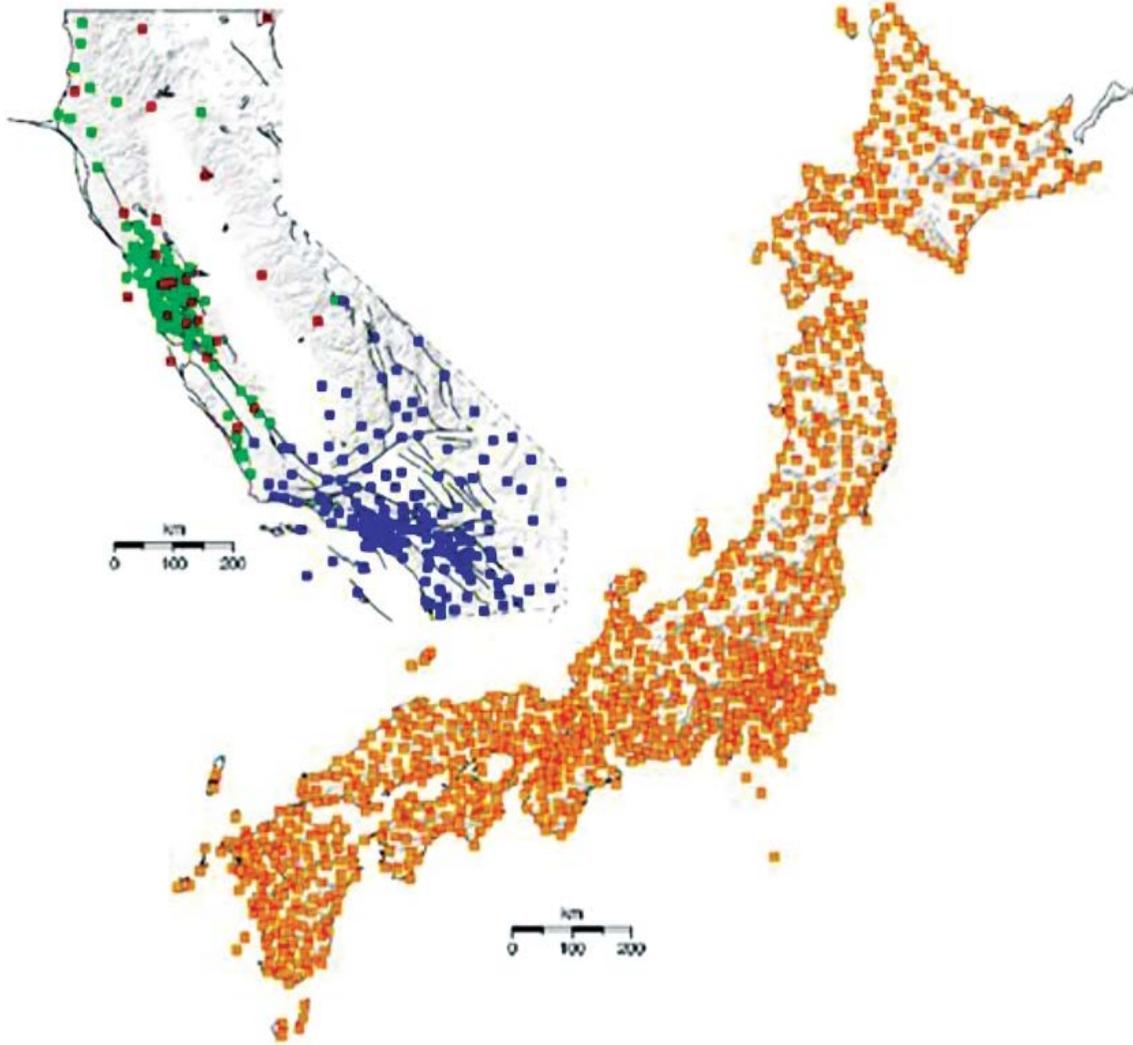




لقد شارك الباحثون في اختبار المرحلة التجريبية لنظام الإنذار المبكر من الزلازل في اليابان قبل أن يصبح جاهزاً للعمل بشكل علني في عام 2007، وفي اختبار المرحلة التجريبية لشبكة كاليفورنيا الزلزالية المتكاملة (CISN) في غرب الولايات المتحدة منذ ذلك الحين 2013.

تمتلك اليابان حالياً أنظمة الإنذار المبكر الأكثر تطوراً في العالم. تم تطوير التحذيرات في البداية لاستخدامها في إبطاء وإيقاف القطارات عالية السرعة قبل حدوث اهتزازات قوية. وقد مهد نجاح هذا البرنامج، بالإضافة إلى الآثار المدمرة لزلزال كوبي عام 1995، الطريق لبناء نظام للإنذار المبكر على الصعيد الوطني. قامت اليابان ببناء شبكة كثيفة من أجهزة قياس الزلازل للكشف بسرعة عن الزلازل. لقد أصدرت تحذيرات عامة منذ عام 2007.





كثافة مستشعر الزلازل: كاليفورنيا مقابل اليابان. يجب إضافة أجهزة استشعار جديدة في كاليفورنيا لتقصير المسافة بين أجهزة استشعار CISON إلى حوالي 12 ميلاً لتسهيل EEW في الوقت المناسب. كلما كانت المسافة بين المحطات أقصر، كانت المنطقة العمياء أصغر لأنه يمكن إصدار التحذيرات بشكل أسرع.





• أخيراً قد تتساءل ماذا يمكن أن تفعل في بضع ثوان بعد التحذير؟

في الواقع فإن بضع ثوانٍ من التحذير يمكن أن توفر وقتاً كافياً لاتخاذ تدابير وقائية:

- ❖ يجب على أفراد الجمهور - أينما كانوا - أن ينزلوا ويحتموا ويصمدوا. إذا كانوا في المنزل، يجب عليهم إطفاء المواقد. إذا كانوا يقودون سياراتهم، فيجب عليهم إيقاف سياراتهم بأمان.
- ❖ يجب على المستجيبين للطوارئ فتح أبواب محطة الإطفاء تلقائياً، وتشغيل الأضواء، وتبنيه المستجيبين للطوارئ تلقائياً، وتحديد أولويات قرارات الاستجابة.
- ❖ يجب على أولئك الذين يقدمون الخدمات الطبية التوقف عن الإجراءات الطبية أو طب الأسنان الحساسة. يجب أن تستعد مراكز الصدمات للوافدين في حالات الطوارئ. ينبغي البدء في خطط الاستجابة للطوارئ مع المرافق النائية.
- ❖ يجب على المرافق حماية محطات الطاقة والبنية التحتية للتوزيع من الاهتزازات القوية.
- ❖ يجب على الصناعات المتضررة حماية الموظفين وبدء إجراءات إيقاف السلامة بما في ذلك عزل وحماية المواد الخطرة في الموقع.
- ❖ يجب على الشركات نقل العمال إلى أماكن آمنة والتأكد من أن أبواب المصاعد مفتوحة أو خارج الخدمة. يجب وضع المعدات الحساسة في الوضع الآمن.





المراجع

- Aceves, Richard L.; Park, Stephen K.; Strauss, David J. (27 May 1996), "Statistical evaluation of the VAN Method using the historic earthquake catalog in Greece", *Geophysical Research Letters*, 23 (11): 1425–1428, Bibcode:1996GeoRL..23.1425A, doi:10.1029/96GL01478, ISSN 1944-8007.
- Aggarwal, Yash P.; Sykes, Lynn R.; Simpson, David W.; Richards, Paul G. (10 February 1975), "Spatial and Temporal Variations in ts/tp and in P Wave Residuals at Blue Mountain Lake, New York: Application to Earthquake Prediction", *Journal of Geophysical Research*, 80 (5): 718–732, Bibcode:1975JGR....80..718A, doi:10.1029/JB080i005p00718.
- Allen, Clarence R. (1983). "The Southern California Earthquake Prediction of 1976: A Prediction Unfulfilled" (PDF). *Proceedings of the Seminar on Earthquake Prediction Case Histories*. Geneva, 12–15 October 1982. UNDR0. pp. 77–82.
- Allen, Clarence R. (December 1976), "Responsibilities in earthquake prediction", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66 (6): 2069–2074, Bibcode:1976BuSSA..66.2069A, doi:10.1785/BSSA0660062069.
- Allen, Clarence R. (December 1982), "Earthquake Prediction – 1982 Overview", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72 (6B): S331–S335, Bibcode:1982BuSSA..72S.331A, doi:10.1785/BSSA07206B0331.
- Anagnostopoulos, Stavros A. (June 1998), "Letter" (PDF), *Physics Today*, 51 (6): 96, Bibcode:1998PhT...51f..15S, doi:10.1063/1.882266, archived from the original (PDF) on 23 March 2014.
- Bakun, W. H.; Aagaard, B.; Dost, B.; Ellsworth, W. L.; Hardebeck, J. L.; Harris, R. A.; Ji, C.; Johnston, M. J. S.; Langbein, J.; Lienkaemper, J. J.; Michael, A. J.; Murray, J. R.; Nadeau, R. M.; Reasenber, P. A.; Reichle, M. S.; Roeloffs, E. A.; Shakal, A.; Simpson, R. W.; Simpson, R. W.; Waldhauser, F. (13 October 2005), "Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake", *Nature*, 437 (7061): 969–





974, Bibcode:2005Natur.437..969B, doi:10.1038/nature04067, PMID 16222291, S2CID 4389712.

Bakun, W.H.; Breckenridge, K.S.; Bredehoeft, J.; Burford, R.O.; Ellsworth, W.L.; Johnston, M.J.S.; Jones, L.; Lindh, A.G.; Mortensen, C.; Mueller, R. J.; Poley, C. M.; Roeloffs, E.; Schulz, S.; Segall, P.; Thatcher, W. (1 May 1987). Parkfield, California, Earthquake Prediction Scenarios and Response Plans (PDF) (Report). U.S. Geological Survey. Open-File Report 87-192.

California Earthquake Prediction Evaluation Council (2 March 2004a), Report to the Director, Governor's Office of Emergency Services (PDF), archived from the original (PDF) on 29 April 2013.

California Earthquake Prediction Evaluation Council (9 December 2004b), Report to the Director, Governor's Office of Emergency Services.

Davies, D. (27 November 1975), "Earthquake prediction in China", *Nature*, 258 (5533): 286–287, Bibcode:1975Natur.258..286D, doi:10.1038/258286a0, S2CID 4266855.

DeVries, Phoebe M. R.; Viégas, Fernanda; Wattenberg, Martin; Meade, Brendan J. (August 2018). "Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes". *Nature*. 560 (7720): 632–634. Bibcode:2018Natur.560..632D. doi:10.1038/s41586-018-0438-y. ISSN 1476-4687. PMID 30158606. S2CID 52118714.

Evans, R. (December 1997), "Assessment of schemes for earthquake prediction: Editor's introduction", *Geophysical Journal International*, 131 (3): 413–420, Bibcode:1997GeoJI.131..413E, doi:10.1111/j.1365-246X.1997.tb06585.x.

Filizzola, C.; Pergola, N.; Pietrapertosa, C.; Tramutoli, V. (1 January 2004), "Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Seismo Electromagnetics and Related Phenomena*, 29 (4): 517–527, Bibcode:2004PCE....29..517F, doi:10.1016/j.pce.2003.11.019, ISSN 1474-7065

Freund, Friedemann T.; Takeuchi, Akihiro; Lau, Bobby W. S. (1 January 2006), "Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts*





A/B/C, Recent Progress in Seismo Electromagnetics and Related Phenomena, 31 (4): 389–396, Bibcode:2006PCE....31..389F, doi:10.1016/j.pce.2006.02.027, ISSN 1474-7065

Geller, Robert J. (17 October 1991), “Unpredictable earthquakes [response to Hamada]”, Nature, 353 (6345): 612, Bibcode:1991Natur.353..612G, doi:10.1038/353612a0, S2CID 5154447.

Hall, Stephen S. (15 September 2011), “At Fault?” (PDF), Nature, 477 (7364): 264–269, Bibcode:2011 Natur. 477..264H, doi:10.1038/477264a, PMID 21921895, S2CID 205067216.

Hayakawa, Masashi (2015), Fundamentals of earthquake prediction, Singapore: John Wiley & Sons, ISBN 978-1-118-77037-5.

Tajima, Fumiko & Takumi Hayashida (2018), Progress in Earth and Planetary Science volume 5, Article number: 63, <https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-018-0221-6#Sec1>.

تم بحمد الله

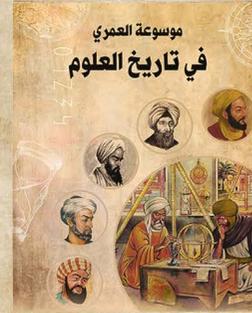
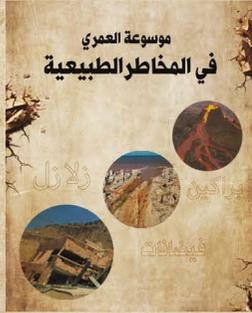




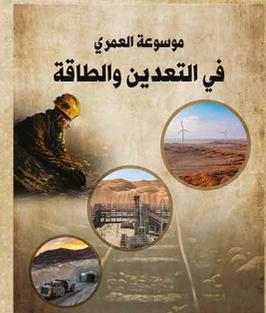
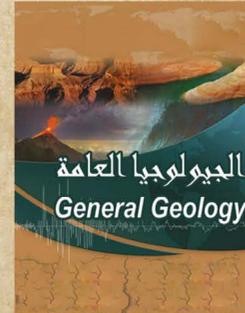
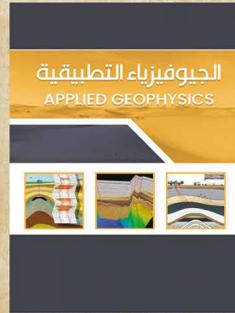
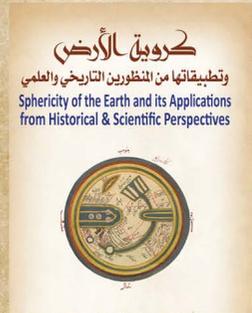
يتمتع الأستاذ الدكتور عبدالله بن محمد العمري بمسيرة علمية حافلة امتدت لأكثر من خمسة وثلاثين عاماً، حيث شغل منصب أستاذ علم الزلازل ورئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء في جامعة الملك سعود بالرياض، ويعمل مشرفاً على مركز الدراسات الزلزالية ورئيساً للجمعية السعودية لعلوم الأرض. يعمل العمري باحثاً رئيساً في 13 مجموعة عمل أمريكية وألمانية ومستشاراً محلياً ودولياً في العديد من الجمعيات والهيئات داخل المملكة العربية السعودية وخارجها. أسس ورأس تحرير أول مجلة عربية للعلوم الجيولوجية تحت إشراف الناشر الألماني Springer وتمحورت أبحاثه العلمية حول نمذجة ومحاكاة ميكانيكية الزلازل والحد من مخاطرها، واستكشاف المياه الجوفية العميقة وتحديد مكامن الطاقة الحرارية الأرضية إلى جانب أعماله البحثية، يبذل العمري جهوداً حثيثة على نشر المعرفة، إذ ألف موسوعات وكتبا تعليمية تخصصية تهدف إلى إثراء المكتبة العربية بمواد تعليمية متفردة، ومن أبرز إنجازاته تأسيس أول موسوعة جيولوجية رقمية للمملكة العربية السعودية في عام 2024، حيث اشتملت على جميع الثروات الاقتصادية والظواهر الجيولوجية فيها، ونشر أكثر من 220 ورقة بحثية وأنجز أكثر من 60 مشروعاً بحثياً و 74 تقريراً علمياً، بالإضافة إلى تأليفه موسوعة تعليمية من 30 كتاباً و 5 موسوعات علمية تخصصية و 3 كتب أكاديمية في علوم الأرض. حصل على العديد من الجوائز ودروع التكريم المحلية والعالمية نظير إنجازاته العلمية المتميزة.



إصدارات المؤلف



1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30



ردمك: 2 - 9596 - 04 - 603 - 978

للنشر
العبيكان
Obekan
Publishing

www.alamrigeo.com