

علاقات تجريبية لاشتقاق قدر الطاقة (M_W) للهزات الأرضية في سورية

محمد جهاد العيسى⁽¹⁾، نضال شقير⁽¹⁾، سامر زيزفون⁽²⁾

(1) المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية، جامعة دمشق

(2) المركز الوطني للرصد الزلزالي، دمشق-سورية

الملخص

يعتبر قدر الطاقة (M_W) من أهم المعلومات الكمية والمطلوب تحديدها من شبكات الرصد الزلزالي المحلية والعالمية والتي تساهم في تطوير الكود الزلزالي وتصميم المنشآت المقاومة للزلازل. ولكنه للأسف غير متوفر لجميع الهزات الأرضية التي حدثت في سورية وسجلتها الشبكة الوطنية للرصد الزلزالي لذلك تم في هذا البحث اشتقاق علاقات تجريبية تربط بين قدر الطاقة (M_W) وبين مختلف أنواع القدر للهزات الأرضية في سورية والواردة في النشرات الزلزالية. وقد بلغ معامل الارتباط الخطي (R^2) قيمة جيدة مما يسمح بالاعتماد على هذه العلاقات تجريبية والحصول على نتائج موثوقة لقدر الطاقة (M_W). أظهرت النتائج أن الفروقات بين قدر الطاقة المحسوب بالعلاقات المشتقة والقدر الوارد في معطيات المركز الزلزالي الدولي (ISC) كانت صغيرة وضمن الحدود المقبولة في معظم الهزات.

الكلمات المفتاحية: مقاييس القدر، قدر الهزات المحلية (M_L)، قدر الطاقة (M_W)، سورية.

Empirical relationships for deriving the moment magnitude (M_w) for earthquakes in Syria

Mohammed.ALISSA⁽¹⁾, Nidal SHOUKEIR⁽¹⁾, Samer ZEIZAFOUN⁽²⁾

(1)Higher Institute of Earthquake studies and Research, Damascus university E-mail: mohammed.alissa1985@gmail.com;

(2) National Earthquake Center (NEC).

Abstract

The moment magnitude is essentially required from the global and local seismic networks as quantitative information to develop the seismic codes, and to use it for design buildings to be more resistant to earthquakes. Unfortunately, the moment magnitude is not available for all seismic events happened in Syria and recorded by the Syrian seismic network. Therefore, the aim of this research is deriving empirical relationships between the moment magnitude (M_w) and the other magnitude scales for earthquakes in Syria, which have been published in the seismic bulletins. The linear correlation factor (R^2) attained good values, which allows to depend on these empirical relationships to get confident results of the moment magnitude (M_w). The results reveal that the residuals between the calculated M_w using these relationships and the observed one in the ISC data are minimal and within the acceptable limits for the majority of events.

Keywords: magnitude scales, local magnitude (M_L), moment magnitude (M_w), Syria.

1- المقدمة

يعتبر قدر الهزات المحلية (M_L) والمعروف بقدر ريختر من أقدم أنواع القدر الزلزالي المستخدمة حيث قام ريختر (Richter, 1935) بحسابه اعتماداً على قياس سعة الموجة الزلزالية المسجلة بجهاز الرصد الزلزالي (Wood-Anderson). لقد لاحظ ريختر وجود تفاوت كبير جداً في سعة الموجة الزلزالية في حالتي الهزات الأرضية الصغيرة جداً والزلازل العنيفة جداً لذلك استخدم المقياس اللوغاريتمي لسعة الموجة المسجلة في تعريف القدر الزلزالي (M_L). ومع مرور الزمن قام علماء الزلازل بتطوير أنواع أخرى من مقياس القدر الزلزالي مثل: قدر الأمواج السطحية (M_S)، قدر الأمواج الجسمية (M_B)، قدر المدة (M_D)، وقدر العزم الزلزالي (M_W) والمعروف بقدر الطاقة (Kanamori 1977; Hanks and Kanamori 1979). يتمتع كل نوع منها بمزايا إيجابية قد لا توفرها بقية الأنواع مثل إمكانية حسابه من التسجيلات المتوفرة أو ملاءمته لطبيعة النشاط الزلزالي أو لحساسية شبكة الرصد لذلك تتضمن النشرات الزلزالية واحداً أو أكثر من تلك الأنواع.

تعتمد الهندسة الزلزالية على المعلومات التي تردّها من مراكز الرصد الزلزالي إذ يتطلب تصميم المنشآت المقاومة للزلازل أن تنفذ دراسات كمية موثوقة لتقييم أخطار الزلزلة والحد من آثارها وبناء قاعدة بيانات تضم معلومات موثوقة عن الزلازل ولأطول فترة زمنية ممكنة ويعتبر القدر الزلزالي من أهم تلك المعلومات والتي تساهم في تطوير الكود الزلزالي. وفي هذا السياق يعتبر قدر الطاقة (M_W) من المعلومات الكمية الأساسية المطلوب تحديدها من شبكات الرصد الزلزالي المحلية والعالمية. تقوم شبكات الرصد الزلزالي المحلية بشكل منهجي باستنباط علاقات تجريبية تتلاءم مع خصائص أجهزة الرصد المستخدمة والخصائص المحلية للقشرة الأرضية وطبيعة النشاط الزلزالي المحلي. وعلى سبيل المثال قامت مجموعة من الباحثين المصريين (Abdulrahman et al., 2008; Hussein et al., 2003) بتطوير عدة علاقات تجريبية تسمح بتحويل قدر الهزات المحلية (M_L) إلى قدر الطاقة (M_W) وقارنوا نتائجها مع تلك المحسوبة في المركز الزلزالي الدولي (ISC). كما استخدم (Abd El-Aal et al., 2020) تسجيلات محطات الرصد عريضة الحزمة (Broad band)، والتي تم تنصيبها في مصر بعد

العام 2010، في تطوير تلك العلاقات بالاعتماد على تسجيلاتها ذات الجودة العالية والتي سمحت بحساب العزم الزلزالي للهزات المحلية. ما يزال قدر الهزات المحلية (M_L) متداولاً حتى الآن بين المراكز الزلزالية ومنها المركز الوطني للرصد الزلزالي في سورية وتقوم هذه المراكز بحسابه للهزات صغيرة القدر والهزات المحلية التي يتم تسجيلها ضمن دائرة لا يتجاوز نصف قطرها 400 كم. لكن استخدام قدر الهزات المحلية (M_L) في تقدير المخاطر الزلزالية (Seismic hazard) يُظهر سيئتان وهما: تأثره بظاهرة الإشباع السعوي للهزات العنيفة والتي يزيد قدرها على ($M_L > 6.0$) وأنه يأخذ قيماً سالبة في حالة الهزات الصغيرة جداً باعتباره مقياساً لوغارتمياً. لذلك يُفضل الكثير من علماء الزلازل والهندسة الزلزالية تجنب هاتين السيئتين واستخدام قدر الطاقة (M_w) والذي يتمتع بالعديد من الميزات التي سنتعرف عليها لاحقاً.

2- هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى اشتقاق علاقات تجريبية تربط بين قدر الطاقة (M_w) وبين مختلف أنواع القدر للهزات الأرضية التي حدثت في سورية والواردة في النشرات الزلزالية. إذ توصي الهيئات العلمية الدولية والمراكز الزلزالية الدولية بحساب قدر الطاقة (M_w) كونه مقياساً مستقراً يمكن الاعتماد عليه في تقدير المخاطر الزلزالية وفي تطوير الكود الزلزالي (Hanks and Kanamori, 1979; Howell, 1981; Ottemoller and Havskov 2003).

3- مواد وطرق البحث

3-1 قدر الطاقة

شاع حديثاً استخدام قدر الطاقة (العزم) M_w والذي يبدي العديد من المزايا فهو أكثر تعبيراً عن الطاقة الزلزالية المتحررة ويمكن تقديره من ملاحظات جيولوجية حقلية وذلك بتحري طول الصدع (L) المولد للزلزال ومقدار الإزاحة الصدعية (D) ومعامل صلابة الصخور (μ) وبذلك تتمكن من حساب العزم الزلزالي باستخدام العلاقة:

$$M_0 = \mu.A.D \quad (1)$$

حيث تمثل (A) مساحة الصدع وهي حاصل ضرب طوله بالعمق التقديري للبوّرة. وتستخدم العلاقة التجريبية التي وضعها (Hanks and Kanamori, 1979) لمنطقة شرق المتوسط في حساب قدر الطاقة:

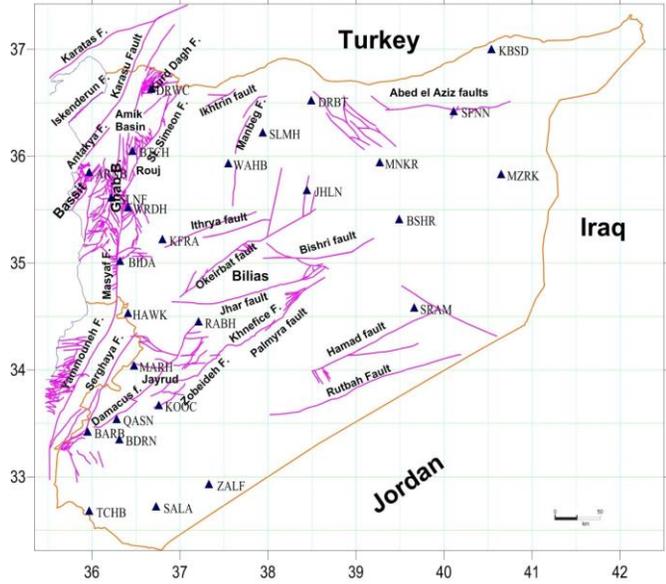
$$M_w = (2/3) \log(M_0) + 10.73 \quad (2)$$

وبالتالي يمكن حساب هذا القدر للزلازل القديمة من خلال التحريات الحقلية للصدوع التي ولدتها. كما يتميز هذا النوع من القدر بأنه لا يتأثر بإشباع السعة الذي يحدث في تسجيلات أجهزة الرصد في حالة الزلازل العنيفة. لكنه بالمقابل يظهر سلبية بأنه غير متوفر لجميع الزلازل وخصوصاً الصغيرة منها لذلك بتطوير طرق حسابية تعتمد التسجيلات الزلزالية مثل طريقة قلب الشكل الموجة لإيجاد مصفوفة العزم الزلزالي التي تطبق على الهزات متوسطة القدر (Jost and Herrmann, 1989)، وطريقة التحليل الطيفي لطيف الإزاحة التي تطبق على الهزات الصغيرة القدر (Iwata and Irikura, 1988).

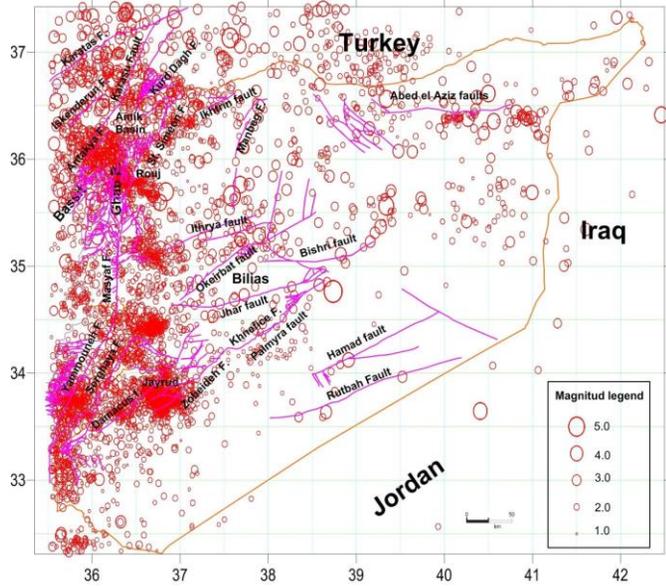
3-2 الوضع الزلزالي في سورية

سمح إنشاء الشبكة الوطنية للرصد الزلزالي عام 1995 بدراسة النشاط الزلزالي الحديث في سورية. وتتألف هذه الشبكة من 27 محطة قصيرة الدور (1 Sec) كان الهدف التصميمي لهذه الشبكة رصد كل نشاط زلزالي قابل للتمييز على طول نظام صدع البحر الميت وفروعه في سورية ولبنان (الشكل 1) (Dakkak et al. 2005). سجلت الشبكة الوطنية السورية للرصد الزلزالي حوالي 5000 حدث محلي منذ تأسيسها في كانون الثاني 1995 ولغاية 2012 (Abdul-Wahed and Asfahani, 2018) وتتركز الزلزالية الآلية الرئيسية (الشكل 2) على طول نظام صدع الأناضول الشرقي والامتداد الشمالي لنظام صدع البحر الميت وخصوصاً في لبنان من خلال عدة زلازل معتدلة ($5 < M_s < 6$). وتتميز زلزالية الداخل السوري بوجود تجمعات عديدة لأحداث ضعيفة القدر ($M_L < 4$) والتي تلاحظ في عدة مناطق مثل منطقة البسيط والشريط الساحلي

(الشكل 2). وصفت العديد من الدراسات السابقة النشاط الزلزالي في سورية على أنه يتراوح بين المعتدل والضعيف (Garfunkel et al., 1981; Chaimov et al.,) حيث أظهرت تسجيلات الشبكة الوطنية للرصد الزلزالي أن هذا النشاط ينتج سنوياً عدداً قليلاً من هزات منخفضة القدر مقارنة مع الدول المجاورة (Abdul-Wahed and Al-Tahan, 2010;) (Abdul-Wahed et al., 2011).



شكل 1. التوزيع الجغرافي لمحطات الرصد الزلزالي (المشار إليها بالرمز ▲) والتابعة للشبكة الوطنية السورية.



شكل 2. النشاط الزلزالي في سورية وجوارها كما وثقته الشبكة الوطنية السورية لرصد الزلزالي من 1995 وحتى 2012 (Abdul-Wahed and Asfahani , 2018).

3-3 حساب القدر الزلزالي في سورية

مر إنشاء الشبكة الوطنية لرصد الزلزالي بمرحلتين أساسيتين. تبدأ المرحلة الأولى منذ تأسيس الشبكة عام 1995 وحتى عام 2008 حيث كانت هذه الشبكة من النوع التشابهي وقد وثقت خصائصها في البحث (Dakkak et al. 2005). أما المرحلة الثانية فتم خلالها تحديث هذه الشبكة واستبدالها بتجهيزات رقمية وبدأت بالعمل في شهر كانون الأول 2008 (Bagh et al., 2014). سمحت المرحلة الأولى بحساب نوع واحد فقط من القدر الزلزالي وهو قدر نهاية التسجيل (M_C) (The coda magnitude: M_C) وذلك باستخدام العلاقة التالية (Bulletin of SNSN, 1995–2012):

$$M_C = -3.0 + 2.6 * \log (T) + 0.001 * D \quad (3)$$

حيث تمثل (T) المدة الزمنية بين بداية وصول الموجة (P) وحتى تلاشي الاهتزاز الناتج عن الهزة الأرضية، أما (D) فتمثل المسافة بين محطة الرصد والبؤرة الزلزالية. أما في المرحلة الثانية فقد مكنت الشبكة الحديثة من حساب قدر الهزات المحلية (M_L) بدقة، بالإضافة لحساب القدر (M_C)، وذلك باستخدام العلاقة التي وضعها (Richter, 1935) هي:

$$M_L = \log(A_{WA}) - \log(A_0) + C \quad (4)$$

حيث تمثل (A_{WA}) السعة العظمى لهزة مسجلة باستخدام جهاز تسجيل زلزالي أفقي معياري من النوع (Wood-Anderson) ذو الدور 0.8 ثانية وموضوع على بعد 100 كم من المركز السطحي لتلك الهزة، ويمثل المعامل ($\log(A_0)$) منحني تصحيح تخامد الأمواج مع المسافة، أما (C) فيمثل معامل تصحيح خاص بكل محطة رصد. يسمح البرنامج (Seisan 10.3) بمحاكاة جهاز الرصد (Wood-Anderson) والذي فعلياً لم يعد مستخدماً وبذلك نتمكن من حساب قدر الهزات المحلية (M_L) بعد ضبط الثوابت الواردة بالعلاقة (2). قام (Bagh et al., 2014) بحساب منحني تصحيح تخامد الأمواج مع المسافة ومعامل التصحيح لجميع محطات الرصد في الشبكة الرقمية الحديثة وضبط بذلك الثوابت المستخدمة في حساب قدر الهزات المحلية (M_L) وفق العلاقة (4).

3-4 إعداد قاعدة المعطيات

نلاحظ مما سبق أن النشرات الزلزالية الصادرة عن المركز الوطني للرصد الزلزالي كانت تتضمن قدر نهاية التسجيل (M_C) فقط خلال الفترة 1995-2008 وأنها اشتملت على قدر الهزات المحلية (M_L) خلال الفترة 2008-2012. وبناء على ذلك كان لابد لنا من توسيع قاعدة معطياتنا لتشمل النتائج المنشورة في المركز الزلزالي الدولي (ISC) فوجدنا أن هناك حوالي 200 هزة أرضية وقعت ضمن الأراضي السورية خلال الفترة 1995-2012 وتم حساب مختلف أنواع القدر لها وبالتالي فإن هذه يمكننا من دراسة الارتباط المتصالب بين قدر الطاقة (M_w) وكل واحد من أنواع القدر الأخرى المحسوبة لتلك الهزات.

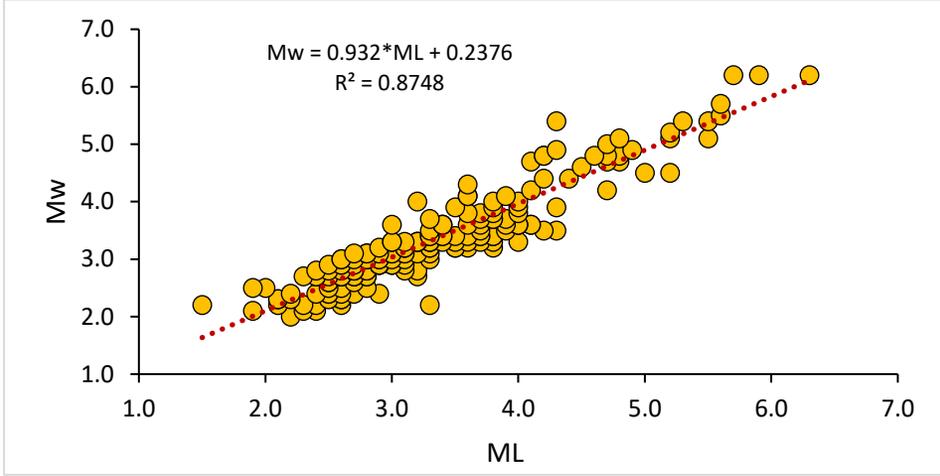
3-5 طريقة المعالجة

تزرخ الأدبيات العلمية المنشورة بالعديد من العلاقات التجريبية التي تربط بين مختلف أنواع القدر وهذه العلاقات تختلف من منطقة إلى أخرى من بقاع العالم وذلك تبعاً للظروف المحلية مثل خصائص القشرة الأرضية وغيرها. لكن الشكل العام لها هو شكل العلاقة الخطية: $(Y=a.X + c)$ حيث تُحدد الثوابت التجريبية (a, c) بطريقة الإرجاع الخطي (Linear regression). يحدد معامل الارتباط الخطي (R^2) جودة العلاقة المستنبطة ومدى تمثيلها للمعطيات المتوفرة وتتراوح قيمته بين الصفر في حالة عدم وجود أي ارتباط بين المتحولين (X, Y) وبين الواحد في حالة الارتباط الخطي التام. استخدمنا البرنامج (Microsoft Excel) لاشتقاق علاقات تجريبية بين قدر الطاقة (M_w) للهزات الأرضية في سورية وبين مختلف أنواع القدر المتوفرة في قاعدة المعطيات.

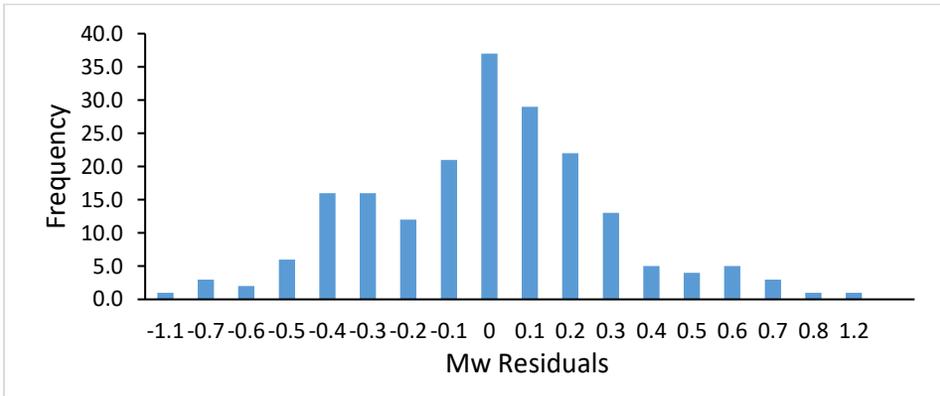
4- النتائج ومناقشتها

تم اشتقاق علاقات تجريبية بين قدر الطاقة (M_w) وبين ثلاثة أنواع رئيسية للقدر متوفرة في المركز الزلزالي الدولي (ISC) وهي: قدر الهزات المحلية (M_L) وقدر المدة (M_D) وقدر الأمواج السطحية (M_S) . ونظراً لكون قدر نهاية التسجيل (M_C) كان الوحيد في المركز الوطني خلال الفترة 1995-2008 فقد تم اشتقاق علاقات تجريبية بينه وبين قدر الهزات المحلية (M_L) بالاعتماد على تسجيلات الشبكة السورية خلال الفترة 2008-2012.

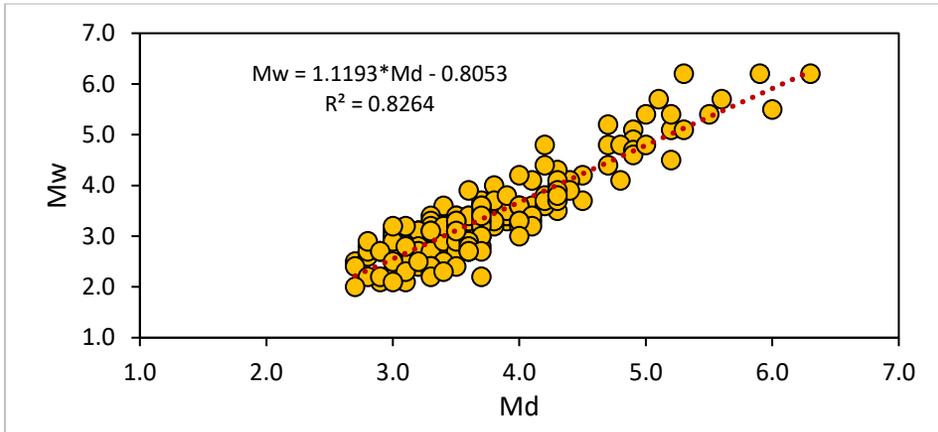
علاقات تجريبية لاشتقاق قدر الطاقة (M_w) للهزات الأرضية في سورية



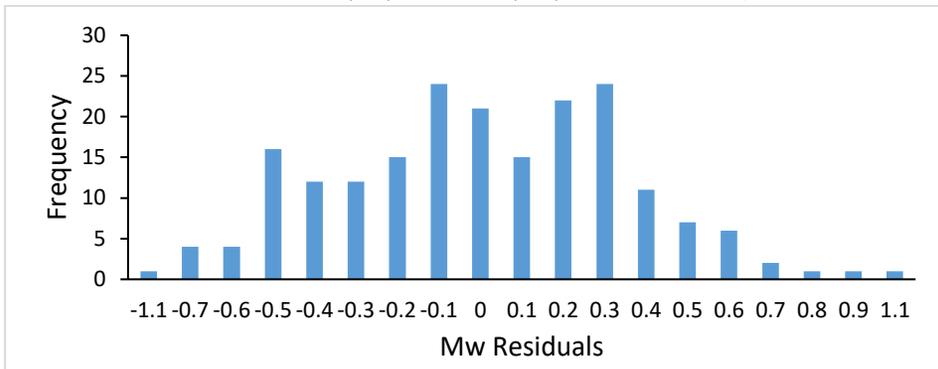
شكل 3. العلاقة التجريبية بين قدر الطاقة (M_w) وقدر الهزات المحلية (M_L).



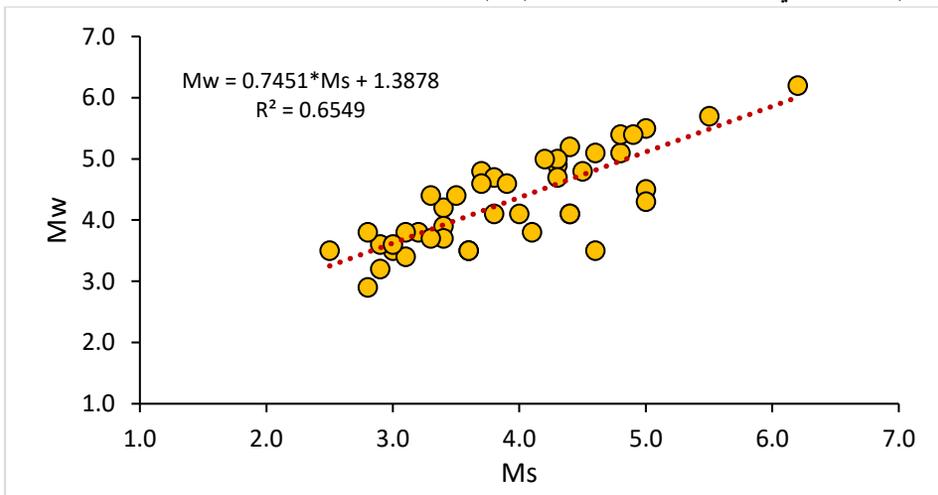
شكل 4. هيستوغرام الفروقات بين قدر الطاقة (M_w) المحسوب من العلاقة التجريبية بين قدر الطاقة (M_w) والملاحظ في قاعدة المعطيات قدر الهزات المحلية (M_L).



شكل 5. العلاقة التجريبية بين قدر الطاقة (M_w) وقدر المدة (M_D).

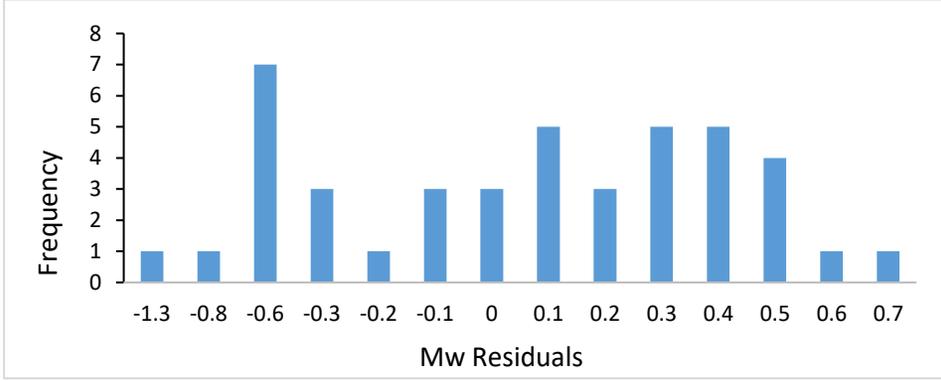


شكل 6. هيستوغرام الفروقات بين قدر الطاقة (M_w) المحسوب من العلاقة التجريبية بين قدر الطاقة (M_w) والملاحظ في قاعدة معطيات قدر المدة (M_D).

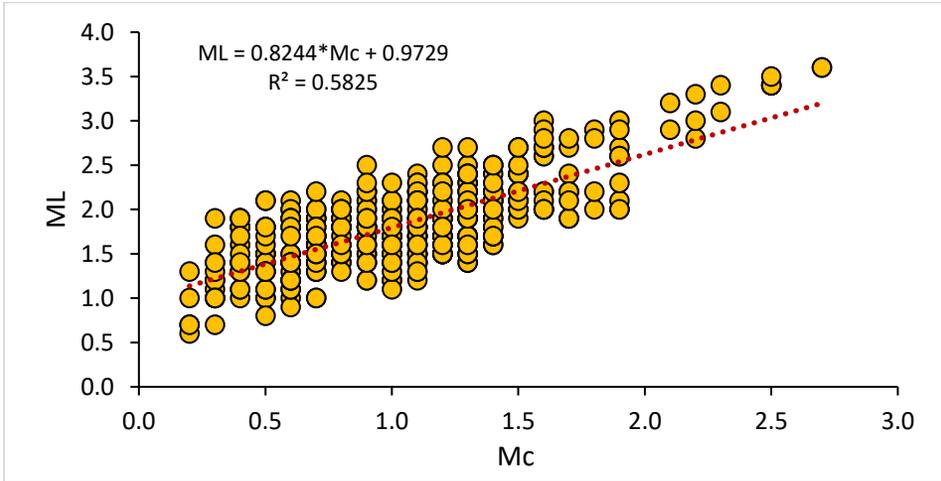


شكل 7. العلاقة التجريبية بين قدر الطاقة (M_w) وقدر الأمواج السطحية (M_s).

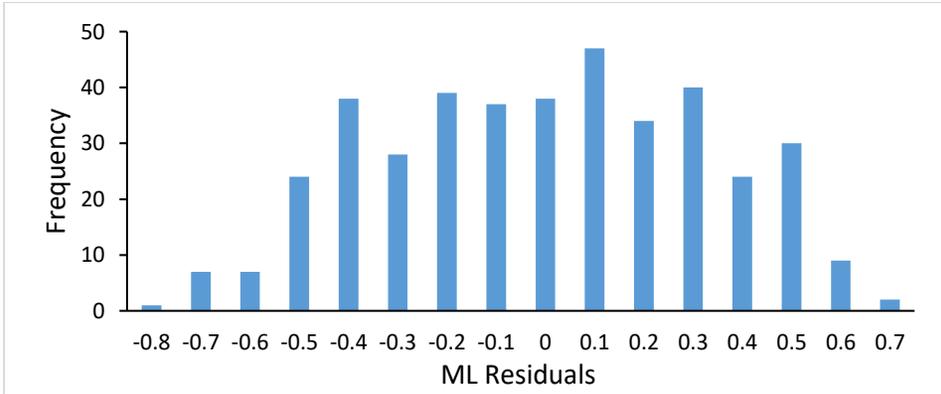
علاقات تجريبية لاشتقاق قدر الطاقة (M_w) للهزات الأرضية في سورية



شكل 8. هيستوغرام الفروقات بين قدر الطاقة (M_w) المحسوب من العلاقة التجريبية بين قدر الطاقة (M_w) والملاحظ في قاعدة معطيات قدر الأمواج السطحية (M_s).



شكل 9. العلاقة التجريبية بين قدر الهزات المحلية (M_L) وقدر نهاية التسجيل (M_C).



شكل 10. هيستوغرام الفروقات بين قدر الهزات المحلية (M_L) المحسوب من العلاقة التجريبية بين قدر الهزات المحلية (M_L) الملاحظ في قاعدة معطيات قدر نهاية التسجيل (M_C).

5- الاستنتاجات والتوصيات

أظهر تحليل معطيات المركز الزلزالي الدولي (ISC) وجود علاقات خطية واضحة بين قدر الطاقة (M_W) وبين كل من قدر الهزات المحلية (M_L) وقدر المدة (M_D) وقدر الأمواج السطحية (M_S) حيث كانت النقاط التجريبية ذات توزع خطي (الأشكال 3، 5، 7) وقد بلغ معامل الارتباط الخطي (R^2) قيمة جيدة جداً فكان 0.87، 0.82 مع قدر الهزات المحلية (M_L) وقدر المدة (M_D) على التسلسل وبلغ قيمة جيدة فكان 0.65 مع قدر الأمواج السطحية (M_S) مما يسمح بالاعتماد على هذه العلاقات تجريبية والحصول على نتائج موثوقة لقدر الطاقة (M_W). تُظهر الأشكال (4، 6، 8) أن الفروقات بين قدر الطاقة المحسوب بالعلاقات المشتقة وقدر الطاقة الوارد في معطيات المركز الزلزالي الدولي (ISC) كانت صغيرة وضمن الحدود المقبولة في معظم الهزات. أما بالنسبة للعلاقة التجريبية بين قدر نهاية التسجيل (M_C) وبين قدر الهزات المحلية (M_L) فكانت خطية مع وجود بعض التبعر للنقاط التجريبية (الشكل 9) وقد بلغ معامل الارتباط الخطي (R^2) قيمة مقبولة نسبياً فكان حوالي 0.58. يمكن تفسير التبعر الملاحظ للنقاط التجريبية بتأثير العامل الشخصي إذ أن قدر نهاية التسجيل (M_C) يعتمد على الدقة في تحديد لحظة تلاشي الأمواج الزلزالية واختفائها ضمن الضجيج الطبيعي وهذا التحديد قد لا يكون سهلاً في بعض الأحيان ويحتاج إلى بعض الخبرة لذلك من المتوقع أن يختلف من شخص لآخر. عموماً يُظهر الشكل (10) أن الفروقات بين قدر الهزات المحلية (M_L) المحسوب من العلاقة التجريبية المشتقة بالاعتماد على قدر نهاية التسجيل (M_C) بين قدر الهزات المحلية (M_L) الملاحظ في قاعدة معطيات الشبكة السورية خلال الفترة 2008-2012 كانت ضمن الحدود المقبولة، وبالتالي يمكن الاعتماد على تلك العلاقة التجريبية والحصول على نتائج مقبولة لقدر الهزات المحلية (M_L) ومن ثم لقدر الطاقة (M_W) من النتائج المنشورة عن المركز الوطني خلال الفترة 1995-2008.

References

- Abdul-Wahed M. K. and Asfahani J., 2018, The recent instrumental seismicity of Syria and its implications, *Geofísica Internacional* (2018) 57-2: 79-92.
- Abdul-Wahed M. K., Asfahani J., Al-Tahan I., 2011, A combined methodology of multiplet and composite focal mechanism techniques for the identification of the seismological active zones in Syria. *Acta Geophysica*, 59, 967-992, DOI:10.2478/s11600-011-0024-2.
- Abdul-Wahed M. K. & Al-Tahan I., 2010, Preliminary outlining of the seismological active zones in Syria. *Annals of geophysics*, 53, 1-9.
- Abd El-Aal A. K., H.E. AbdelHafiez, Hamada Saadalla & M. Sami Soliman (2020) A homogenous moment magnitude and local magnitude scaling relation for earthquakes in Egypt, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 9:1, 532-538, DOI: 10.1080/20909977.2020.1794445
- Abdulrahman EM, Dessoky MM, Hussein HH, Abd-El Wahed MF. 2003. Estimation of seismic moments from local magnitudes and coda durations for Cairo earthquake aftershocks recorded at Kottamiya (KEG) broadband station. *Ann Geophys.* 46(6):39–46.
- Bagh S., Alhasan A., and Tello S., 2014, Local Magnitude Calibration of the Syrian National Digital Seismological Network, *Seismological Research Letters* Volume 85, Number 2, 324-333. doi: 10.1785/0220130021
- Barazangi, M., Seber, D., Chaimov, T., Best, J. & Sawaf, T., 1993. Tectonic evolution of the northern Arabian plate in western Syria, in: Boschi et. al., (eds.) *Recent Evolution and Seismicity of the Mediterranean Region*, pp. 117-140, Kluwer Academic Publisher, the Netherlands.
- Chaimov, T. A. & Barazangi, M., Al-Saad, D., Sawaf, T. & Gebran, A., 1990. Crustal shortening in the Palmyride fold belt, Syria, and implications for movement along the Dead Sea fault system, *Tectonics*, 9, 1369-1386.
- Dakkak R., Daoud M., Mreish M., Hade G., (2005), The Syrian National Seismological Network (SNSN): Monitoring a major continental transform fault, *Seismological Research Letters*, Vol. 76, PP 437-445.
- Garfunkel Z., Zak Y. & Freund R., (1981), Active faulting in the Dead Sea rift, *Tectonophysics*, Vol. 80, PP. 1-26.
- Hanks TC, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale. *J Geophys Res.* 84:2348–2350. doi:10.1029/JB084iB05p02348.
- Howell BF. 1981. On the saturation of earthquake magnitude. *Bull Seismol. Soc. Am.* 51:1013–1018.
- Hussein HM, Abou Elenean KM, Marzouk IA, Peresan A, Korrat IM, Abu El-Nader E, Panza GF, El-Gabry MN. 2008. Integration and magnitude homogenization of the Egyptian earthquake catalogue. *Nat Hazards.* 47:525–546. doi:10.1007/s11069-008-9237-3.
- Iwata T, Irikura K. 1988. Source parameters of the 1983, Japan Sea earthquake sequence. *J Phys Earth.* 36 (4):155–184. doi:10.4294/jpe1952.36.155.
- Jost ML, Herrmann RB. 1989. A student's guide to and review of moment tensor. *Seismol Res Lett.* 60(2):37–57. doi:10.1785/gssrl.60.2.37.
- Kanamori H. 1977. Energy-release in great earthquakes. *J Geophys Res.* 82:2981–2987. doi:10.1029/Jb082i020p02981.
- Ottmoller L, Havskov J. 2003. Moment magnitude determination for local and regional earthquakes based on source spectra. *Bull Seismol Soc Am.* 93:203–214. doi:10.1785/0120010220.
- Richter CF. 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull Seismol Soc Am.* 25:1–32.