

التخامد اللامرّن للأمواج الجسميّة في جنوب سورية

محمد ياسر شرف الدين*¹ خالد عمر² محمد خير عبد الواحد³

¹ طالب ماجستير، قسم علم الزلازل، المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية، جامعة دمشق.

Yaser.sharaf@damascusuniversity.edu.sy

² مدرس، قسم علم الزلازل، المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية.

Khalid.omar@damascusuniversity.edu.sy

³ دكتور، باحث في هيئة الطاقة الذرية.

mabdulwahed@aec.org.sy

المخلص:

تم في هذا البحث شرح مفصل للتخامد اللامرّن بإطاره النظري أولاً، متضمناً شرح تأثير مسير الأمواج ضمن أعماق القشرة الأرضية من المنبع باتجاه المستقبل ضمن أوساط غير متجانسة ونشطة تكتونياً، وانعكاس هذا المسير على الأمواج من خلال التخامد الذي يظهر بشكل تخامد تحولي وتخامد تبعثري، ومن ثم شرح العلاقات الرياضية للتخامد، وأمواج كودا مع لمحة عن طرائق حساب التخامد كما ساقه الباحثون فيما سبق من الدراسات والأبحاث المرجعية. والإطار العملي ثانياً، ويتضمن الخطوات المتبعة لحساب التخامد بطريقة تلاشي أمواج كودا (Coda wave Decay Method) بحيث طبقت هذه الطريقة على منطقة جنوب سورية باستخدام 31 حدث زلزالي مسجل في المركز الوطني للزلازل في 38 محطة بمجموع (210) تسجيل زلزالي بين عامي (2009-2024) بقدر تتراوح بين (5-2) على ترددات مركزية (1-24) هرتز بمجموع 7 ترددات مركزية. نتج عن حسابات التخامد خرائط كونتورية ممثلة لتغيرات معامل الجودة مقابل كل تردد مركزي على حدة، إضافة لاستخراج معاملات التخامد الأساسية (Q_0 ، α) ومن ثم الحصول على المعادلة العامة للتخامد في منطقة الدراسة لتكون بالشكل $Q_c = 130 \mp 26 \cdot f^{0.81 \mp 0.08}$ بحيث أظهرت قيم Q_0 المنخفضة نسبياً (130) كون التخامد عالي في المنطقة المدروسة بسبب انتشار التشوهات التكتونية و الصدوع، وقيم الثابت (α) المرتفعة (0.81) الارتباط العالي للتخامد بالتردد في المنطقة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: معامل الجودة، التخامد اللامرّن، أمواج كودا، طريقة تلاشي أمواج كودا.

تاريخ الايداع: 2025/12/19

تاريخ القبول: 2026/4/6



حقوق النشر: جامعة دمشق -
سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق
النشر بموجب CC BY-NC-SA

Inelastic attenuation of Body waves in southern Syria

**Mohamad Yasser sharaf aldein*¹ Khaled omar²
Mohamad khair abdul-wahed³**

*¹. Master's degree Student, Department of Seismology, Higher Institute of Earthquake studies & Research, Damascus University.

Yaser.sharaf@damascusuniversity.edu.sy

². Professor Assistant, Department of Seismology, Higher Institute of Earthquake studies & Research, Damascus University.

Khaled.omar@damascusuniversity.edu.sy

³. Doctor, researcher at Atomic energy commission.

mabdulwahed@aec.org.sy

Abstract:

In this study, inelastic attenuation has been explained methodological and practical both theoretically including traveling effect of seismic waves through the earth crust from source to receiver in heterogeneous and tectonically active medium, and its reflecting on the seismic waves (the attenuation), showing up like scattering attenuation and intrinsic attenuation, then explaining the mathematical equation of the attenuation and coda waves with a hint about the attenuation calculation methods as were used from authors in previous researches with detailed explanation about the coda decay method (CWD) that were applied in southern Syria using 31 earthquakes recorded in the (N.E.C) in Syria using 38 receiver to be (210) seismograms in total between (2009 -2024), with magnitude from (2-5) , for 7 central frequency (1-24)hz.

From attenuation calculation, resulting countour maps represent quality factor changes in the study zone for every central frequency, in addition to the basic attenuation parameters (Q_0, α) that form the attenuation general equation to be ($Q_c = 130 \mp 26 . f^{0.81 \mp 0.08}$) where it shows low Q_0 values (130) reflecting high attenuation resulting from high tectonic deformations and faults , and the same for the constant(a) with high value(0,81) referring to high dependency for attenuation on frequency in the study zone.

Key words: Quality factor, Inelastic attenuation, Coda waves, Coda wave decay methods.

Received: 19/12/2025

Accepted: 6/4/2026



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a

CC BY- NC-SA

المقدمة:

تتأثر الأمواج الزلزالية خلال المسار الذي تمر به بخصائص الصخور في القشرة الأرضية والسطوح الفاصلة بين الطبقات الجيولوجية فيطراً انخفاض في سعتها يسمى بالتخامد (Attenuation). يدخل التخامد ضمن تأثير المسار (Path effect) والذي يؤثر في الشكل الموجي للإشارة الزلزالية بالإضافة إلى تأثير المنبع والموقع. يُعرف تخامد الأمواج الزلزالية فيزيائياً بأنه: تناقص سعة الأمواج الزلزالية خلال انتشارها في طبقات القشرة الأرضية نتيجة للانتشار الهندسي (Geometrical Spreading) والتخامد التبعثري (Scattering Attenuation) نتيجة لعدم تجانس خواص الوسط، بالإضافة إلى الامتصاص الداخلي (Intrinsic Absorption) نتيجة احتكاك حبيبات الصخور المكونة للقشرة الأرضية (Padhy et al. 2011) [1]. تلعب دراسة معامل جودة الطبقات (Q) دوراً مهماً في دراسات بنية القشرة الأرضية، حيث يمكن استنتاج معلومات مفيدة عن خصائص الوسط والتي تكون ضرورية لدراسات وتقييم المخاطر الزلزالية. وفي العقود الثلاثة الماضية، أُستخدمت دراسات مختلفة في أجزاء كثيرة من العالم (Azzaro et al., 2013; Del Pezzo et al., 2016; Singh et al., 2016; Giampiccolo, 2018) حيث تعتمد دراسة معامل جودة الطبقات (Q) على موجات كودا من الزلازل الصغيرة لتحديد خصائص التخامد للقشرة. ويُوفر التنوع الكبير في المسارات التي تنتقل عبرها هذه الموجات المتناثرة مجموعة معلومات تتعلق بخصائص الوسط ويعتمد تخامد الموجات الزلزالية في الغلاف الصخري بشكل كبير على التردد وينتج عن مزيج من تأثيرين وهما: التشتت والتخامد غير المرن ومن الصعب فصل بعضهما عن البعض، لأن لكل منهما اعتماداً مماثلاً على زمن الارتحال أو المسافة. ويعتمد التخامد غير المرن بشكل كبير على البيئة التكتونية كما هو موضح في العديد من الدراسات التي أجريت في أماكن مختلفة من العالم (على سبيل المثال، Havskov et al. 1989) [2].

1- الدراسات المرجعية:

قامت (محمد، 2012)، بدراسة خصائص انتشار الأمواج الزلزالية في سورية والتي سمحت بتوصيف خصائص انتشار وسلوك الأطوار الموجية المختلفة لأكثر من 340 زلزال مسجلة في 57 محطة رصد زلزالي في الشبكة الوطنية السورية او الشبكات المجاورة في تركيا وقبرص والأردن. وذلك بتطبيق التقانة التيموغرافية السيزمية (Seismic Tomography Technique) حيث تم دراسة الطور الموجي Lg الذي ينقل معظم الطاقة الصادرة عن الزلازل الكبيرة إلى المسافات التي تزيد عن 150 كم، ووضعت النموذج التيموغرافي ثنائي البعد لتغيرات قيم Lg و LgQ_0 لسورية والمناطق المجاورة. وقد تراوحت القيم المحسوبة ل Q بين (60 و 400). كما أشارت بأن قيم LgQ_0 تراوحت بين 150 - 225 في المنطقة الجنوبية الغربية وهي منخفضة مقارنة بالمناطق الأخرى، ويعود ذلك إلى التغيرات في سماكة القشرة الأرضية وعمليات التشوه الصفيحية التي تؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة إضافة للانتشار الواسع للتوضعات البركانية، أما في المنطقة الجنوبية تصل قيمة Q إلى 300 في نطاق نهوض الرطبة وشرق الأردن [3].

ونفذت (قنواتي، 2024) حسابات القدر الزلزالي لحوالي 449 هزة، مع إعادة تحديد مواقع الهزات باستخدام محطة واحدة ومحطتين وثلاث محطات. كما تم إعادة تحديد مواقع الهزات المشتركة مع الشبكتين اللبنانية والسورية بدمج قراءات محطات الرصد اللبنانية والسورية والمحطات المستخدمة في البحث وهذا أعطى نتائج أدق بسبب زيادة عدد قراءات محطات الرصد. ومن ثم تم دراسة الأطوار الموجية القشرية والمسارات المختلفة لها من البؤرة الزلزالية إلى محطات التسجيل وحساب أزمدة المسير وحساب التضخم ومعامل الجودة (Q) باستخدام طريقة أمواج كودا لمعرفة خصائص انتشار الموجات الميكروزلزالية في البنى الجيولوجية في منطقة

التخامد اللامرّن للأموّاج الجسميّة في جنوب سورّيّة
 الدارسة. أظهرت نتائج معامل الجودة أنّ منطقة القلمون تتميز بتخامد كبير ناتج عن بنيتها التكتونية المعقدة. بحيث نتج عن حسابات قيم التخامد في المنطقة خرائط كونتورية للتخامد عند الترددات المركزية (16، 8، 4، 2) [4].
 لاحقاً قام (Bao, et al 2011) بإنشاء خريطة تخامد زلزالي للطور الإقليمي Pg لمنطقة شمال الشرق الأوسط باستخدام قياسات Q المعتمدة على التردد من محطتين وتوموغرافيا التخامد الزلزالي. تظهر الصور المقطعية للتخامد في شمال الشرق المتوسط تغيرات كبيرة في قيمة (Qpg) والتي قد تكون بسبب التغيرات في تركيب القشرة نفسها، كما يلاحظ تنوع كبير في نموذج (Qpg)، مثل قيم (Qpg) المنخفضة ضمن الصفيحة الأناضولية والقيم المرتفعة لـ (Qpg) ضمن أغلب الصفيحة العربية [5].
 ثم استخدم (sandvol et al, 2001) مجموعة كبيرة من البيانات للتسجيلات المحلية والإقليمية المسجلة في الشرق الأوسط، تصل لحوالي 5000 تسجيل زلزالي من 65 محطة و2200 حدث، بهدف تحليل خصائص ونمط انتشار الأمواج الزلزالية الإقليمية، كما وضعت خريطة مناطق للانتشار الفعال وغير الفعال لـ (Lg) و (Pg) و (Sn) خلال الشرق الأوسط، وذلك باستخدام تقنيتين توموغرافيتين تم تطويرهما لتحديد مناطق التخامد الليتوسفيري ضمن الشرق الأوسط. ولوحظ في النتائج وجود دلائل على زيادات كبيرة في تخامد Lg، متعلق بـ Pg في منطقة طيات بيتليس (Bitlis) وطيات زاغروس وأحزمة الإزاحة في الحدود بين الصفائح العربية الأوراسية، كما لوحظ وجود مناطق للانتشار غير فعال لـ (Sn) على طول نظام صدع البحر الميت (DSFS) [6].

2- الوصف التكتوني والجيولوجي:

تعد منطقة الدراسة بالنسبة للوحدات البنائية الرئيسية في سوريا جزءاً من النطاق المستقر نسبياً لمنحدر الصفيحة العربية، يتميز بعدم عمق الركيزة وانعدام التمايزات في الغطاء الرسوبي ذي السماكات القليلة وخفيف الالتواء (حسين، 2012). ويتضمن كل من [7]:

أ- نهوض الأردن:

يظهر في سورية في نهايته الشمالية. مقطعه العرضي قنطرة ضخمة، جناحها الغربي شديد الانحدار، أما جناحها الشرقي فخفيف الميل. يحده من الغرب الوادي الإنزياحي (الإنهدامي) لنهر الأردن الذي ينتسب إلى المجموعة الشمالية لنظام الصدوع الأفريقية الكبرى Grand African fault system والتي تعد استمراراً لهذه الأخيرة. يملأ الغور سماكة كبيرة من رسوبات النيوجين والرباعي البحرية المنشأ بشكل أساسي. صخور النهوض بحد ذاته فتتسبب إلى الترياسي - الجوراسي - الكريتاسي. ولقد رفعت الحركات التكتونية الحديثة رسوبات البليوسين بتأثير الصدوع إلى مستوى أعلى من قاع الغور [7].

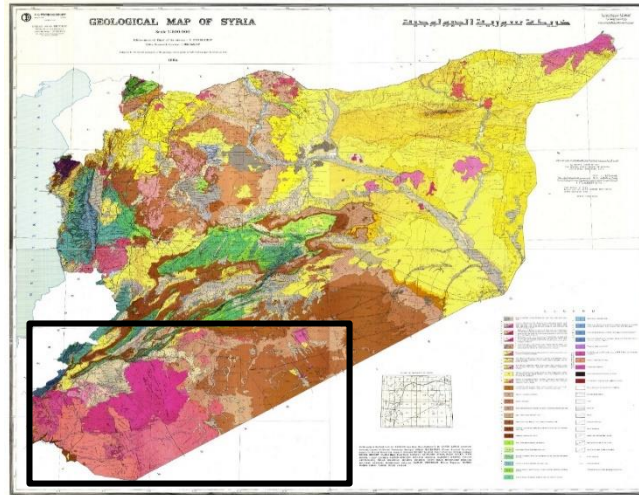
ب- منخفض جبل العرب:

يملاً هذا المنخفض سماكة كبيرة من الصبات البازلتية النيوجينية والرباعية الأفقية التوضع. ومن المحتمل أن الرسوبات الباليوجينية وما قبل الباليوجينية في هذه المنطقة والقابعة في الأسفل ذات سماكات أكبر منها في منحدرات نهوضي الرطبة والأردن. يعقد بنية منخفض جبل العرب مجموعة من الصدوع تتجه نحو الشمال الغربي، موازية بذلك لمحور هذا المنخفض، ويشير إلى هذه الصدوع صفوف من القمم البركانية تأخذ نفس اتجاهها. تعد هذه الصدوع عميقة نظراً لأنها استخدمت وخلال فترة طويلة من تطورها كأقنية لتصريف الاندفاعات الحممية. عمليات البركنة الواسعة في هذا المنخفض ترتبط بتطور النظام الإنزياحي للفياتتي [7].

ج- نهوض الرطبة:

التخامد اللامرّن للأموّاج الجسميّة في جنوب سورّيّة
 تتألّف نواة هذا النهوض (قنطرة) من صخور ترياسيّة وجوراسيّة تتوضع طبقاتها بشكل أفقي تقريباً، أو تميل ميلاً خفيفاً. بينما يتألّف المنحدر الشمالي للنهوض من رسوبات كريتاسيّة وباليجينية يلاحظ فيها طيات خفيفة من نمط الحدبات القصيرة - Brachy Anticline، يكون لأضخمها شكل بيضوي (في مقطعه العرضي). يتراوح طول محاورها من 10 - 80 كم وعرضها من 5,5 كم. تتألّف قناطر (القسم العلوي أو القمة) هذه الطيات من طبقات صخور الأيوسين الأسفل أفقية التوضع. ويقدر ميل أجنحة هذه المحدبات الطولية ب (1-2) ° ونادراً ما تصل إلى (3 - 5) ° تكون قناطر المحدبات الضخمة واضحة على السطح بشكل تضاريس ناهضة كما تنتشر المنخفضات الموضعية بين عدد من هذه المحدبات الطولية. تملأ هذه المنخفضات رسوبات النيوجين والرباعي الشكل (1).

يحد نهوض الرطبة من الشمال مجموعة من الصدوع ذات الامتداد العرضي ظهر آثارها على التضاريس بشكل نتوءات طولية. ويلاحظ على طول امتدادها انتشار مناطق صخرية من نمط البريش. وإن مرايا بعض الصدوع تكون ظاهرة، كما تنتشر طبقات الصخور المطوية إلى جوار هذه الصدوع إضافة إلى بعض المخاريط لبركانية. تمتد الصدوع العرضية من 150 - 200 كم، ورغم ذلك فهي ذات رمية ضعيف نسبياً (عدة عشرات من الأمتار). يرافق هذه الصدوع عدد كبير من الشقوق نشر موازية لاتجاه الصدوع أو تكون عمودية عليها.



الشكل (1) خريطة جيولوجية لسوريا والمربع يمثل المنطقة المدروسة. الخريطة من الموقع الرسمي للمعهد الجيولوجي، الأكاديمية الروسية للعلوم

3- الطريقة:

تُشكّل موجات كودا نهاية الإشارة الزلزالية للأحداث المحلية والإقليمية، وتبدأ بالوصول بعد الموجة العرضية (S) تتكون موجات الكودا من موجات غير مترابطة ومشتتة بفعل عدم التجانس، ويُعتقد أن سعتها تتناقص فقط بسبب التخامد (بما في ذلك التشتت) والانتشار الهندسي. يمكن التعبير عن تناقص سعة كودا $A(f, t)$ كدالة للتردد f والزمن t على النحو التالي [8]:

$$A(f, t) = t^{-\beta} A_0 e^{-\frac{\pi f t}{Q_0}}, \quad (1)$$

التخامد اللامرّن للأموّاج الجسميّة في جنوب سورّيّة
 حيث A_0 هي السعة الابتدائيّة، و β هي معامل الانتشار الهندسي (1.0 للموجات الجسميّة، و 0.75 لموجات الانتشار، و 0.5 للموجات السطحيّة)، و Q_c هي تخامد كودا.

يُفترض عادة أن معامل الانتشار الهندسي يساوي 1.0. نظراً لاستخدام الجزء المبكر من ذروة الموجة للزلازل المحليّة. بأخذ اللوغاريتمات وإعادة ترتيبها، يمكن كتابة المعادلة (1) على النحو التالي [8]:

$$\ln[A(f, t)] + \beta \ln(t) = \ln(A_0) - \frac{t f \pi}{Q_c(f)}. \quad (2)$$

يُعطى رسم المنحني (الطرف الأول من المعادلة (2)) كدالة ل t عند تردد مركزي مُحدد (عن طريق تصفية الإشارة حول التردد المركزي ضمن نطاق حزمة التمرير)، خطاً مستقيماً ما بميل $(-\pi f = Q_c f)$ ويمكن تحديد Q_c باستخدام المربعات الصغرى. يمكن الحصول على المنحني بحساب قيم جذر متوسط التربيع (rms) في نافذة تشغيل بطول مُحدد، تبدأ عند وقت مُحدد، والوقت المنقضي، وبعد وقت بدء الحدث. وكبديل، يُحسب المنحني أحياناً باستخدام تعريف المنحني مع تحويل هيلبرت H كما يلي [8]:

$$\text{Envelope}(f, t) = \sqrt{H[A(f, t)]^2 + A(f, t)^2}. \quad (3)$$

تُسمى هذه الطريقة بطريقة انحلال موجة كودا (CWD: Coda wave Decay Method) [8]، وهي الطريقة الأكثر استخداماً لتحديد كودا Q . وقد تم تطبيقها في العديد من الأبحاث العلمية مثل (Bianco et al., 2002; Mak et al., 2004; Mukhopadhyay et al., 2008; Carcole and Sato, 2010; Calvet and Margerin, 2013; Singh et al., 2015).

أشار (Kumar et al., 2006) إلى أن تحديد Q_c لا يتأثر بالتخامد القريب من السطح، ولا بتضخيم التربة [9]. يُعتقد أن كودا Q (Q_c) تتكون من تبعثر وتحويل Q ، كانت الدراسات الحديثة أكثر اتساقاً في إيجاد أن Q_{sc} هي المهيمنة على المسافات القصيرة (0-100 كم)، بينما تكون Q_i هي المهيمنة على المسافات الأكبر، على سبيل المثال وبزمن منقضي قدره 80 ثانية، ظهر توافقاً وثيقاً بين Q_i و Q_c . [8]

كما لوحظ أيضاً أن هناك فرقاً فيما يتعلق بالتردد بالنسبة للبيانات على مسافات قصيرة. فعند الترددات الأقل من 6 هرتز، كان التبعثر هو السائد، بينما كان تخامد التحولي هو السائد عند الترددات الأعلى من 6 هرتز. [8].

$$Q_c = Q_0(f/f_0)^\alpha, \quad (4)$$

بحيث Q_0 هي Q عند تردد مرجعي f_0 و α ثابت. وأغلب الدراسات تفترض $f_0 = 1$ hz لتصبح المعادلة بعد ذلك بالشكل: [8]

$$Q_c = Q_0 f^\alpha, \quad (5)$$

المعادلة (5) هي المعادلة العامة للتخامد.

يستخدم برنامج Seisan في حساب التخامد من خلال إضافة تسجيلات الأحداث الزلزالية إلى البرنامج ومن ثم تحديد الوصلات الموجية الرئيسية بالإضافة لتحديد الزمن المنقضي من خلال ادخال معاملات حساب التخامد ضمن برنامج (Seisan) (Havskov, 2016) بحيث يكون ضعفي زمن وصول الموجة العرضية S [8] ومن ثم تطبيق فلتر باستخدام مصفي Butterworth عند 7 ترددات مركزية (1-2-4-8-10-16-24).

التخامد اللامرّن للأموّاج الجسميّة في جنوب سورّيّة
شرف الدين، عمر وعبد الواحد
تنتج قيم معامل الجودة للترددات المركزيّة وتسنّد إلى نقطة المنتصف بين المنبع والمحطة، تستخدم القيم الناتجة في رسم خرائط
كونتوريّة تمثل خطوط تسوية قيم معامل الجودة ضمن المنطقة المدروسة، ويمكن من هذه القيم الحصول على قيم Q_0 و α
وبإدخالها ضمن المعادلة العامة للتخامد تظهر معادلة التخامد للمنطقة المدروسة.

4-البيانات:

طبقت الطريقة المذكورة انفاً على 31 حدث زلزالي وهي مسجلة على 38 محطة رصد وهذا يوفر ما مجموعه 210 تسجيل زلزالي
صالح لتطبيق منهجية البحث. يعرض الجدول رقم(1) بعض التفاصيل عن تلك الأحداث الزلزالية ومن ثم الشكل(2) يوضح خارطة
البؤر الزلزالية لتلك الأحداث.

الجدول (1) معلومات الأحداث المدروسة في البحث متضمنة لموقع البؤرة والزمن والقدر

م	year	month	date	hr	min	sec	Longitud	Latitude	depth	MI
1	2009	12	20	0	25	23.8	35.339	33.207	0	2.4
2	2010	3	20	18	45	29.6	35.676	32.931	0	3.1
3	2010	3	27	0	5		35.697	33.66	6.3	2
4	2010	11	14	18	48	13.4	35.551	33.097	0.9	2.5
5	2011	1	1	16	31		35.677	32.712	10	3.4
6	2011	1	20	21	38	49.7	35.51	33.052	0	3.2
7	2011	6	8	21	26		35.793	33.264	10	2
8	2011	9	21	21	56	6	35.375	33.329	5.8	2.7
9	2012	4	21	6	17	15.1	39.522	33.965	38.3	3.1
10	2012	4	22	8	17	46.2	37.449	34.65	235.2	3
11	2012	7	3	10	54	19.2	40.589	33.377	341.2	3
12	2012	7	10	17	35	2.8	35.579	33.072	4.2	2.9
13	2012	11	18	3	54	4.6	35.455	33.083	15.2	2.9
14	2012	12	3	5	14	49.9	34.65	33.672	13.5	3.1
15	2013	5	1	6	50	53	41.075	34.331	16.7	3.6
16	2013	10	17	18	17	53.2	35.612	32.812	8.5	3.1
17	2013	10	20	12	54	6.4	35.622	32.82	6.8	3.2
18	2018	4	17	15	45	33.1	36.959	33.923	31.9	3.3
19	2018	7	8	21	42	47.7	35.755	32.812	2.4	3
20	2018	7	22	6	41	28	35.791	32.801	3.8	3.4
21	2018	7	27	8	51	20.7	35.756	32.869	14.9	3.2
22	2018	11	3	17	42	52.8	35.195	33.712	34.4	3.3
23	2020	2	6	4	53	58.2	35.377	32.752	101	4.2
24	2020	4	22	13	55	35.8	38.461	33.323	104.8	3
25	2020	6	5	5	23	2.2	35.401	33.075	0	2.5
26	2022	5	15	20	14	21.5	35.784	33.884	0	2.2
27	2022	9	21	18	22	56.7	35.955	33.905	0.9	2.2
28	2022	11	18	11	36	22.6	35.326	33.434	0	2.8
29	2023	6	3	11	15	43	35.874	33.887	10	2.5
30	2024	3	12	3	59	51.6	35.806	33.418	9.7	2.4
31	2024	3	13	10	50	31.8	35.632	32.95	18	3.7



الشكل (2) توزيع الأحداث المسجلة والمستخدمة في حساب التخامد

5-النتائج والمناقشة:

نتج عن حسابات التخامد على برنامج Seisan [10] قيم معاملات الجودة عند كل تردد مركزي على حدة وتم ادخال هذه القيم ضمن برنامج Surfer بهدف الحصول على خرائط كونتور لخطوط تسوية معامل الجودة، تمثل تغيرات معامل الجودة ضمن منطقة الدراسة.

-المعادلة العامة للتخامد:

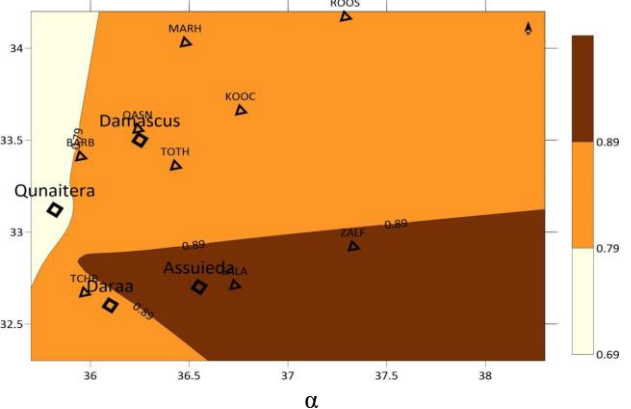
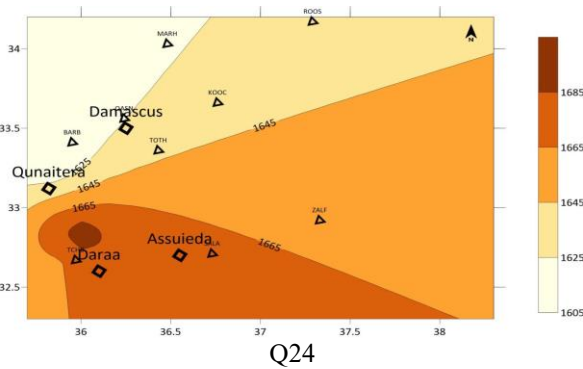
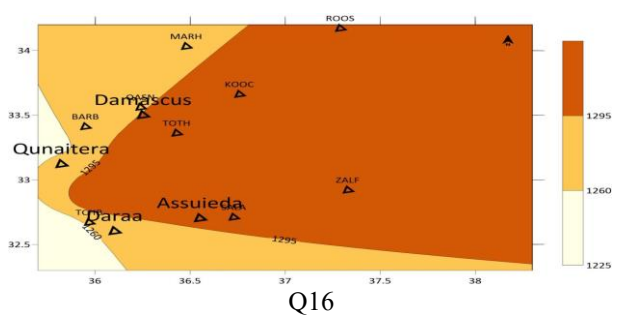
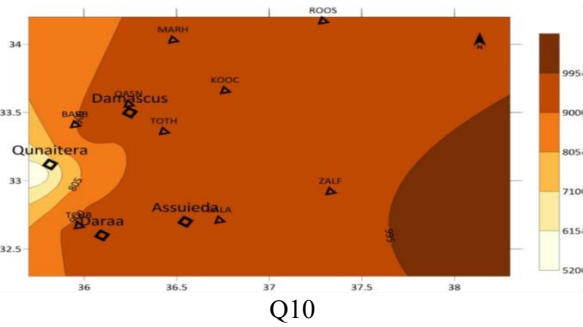
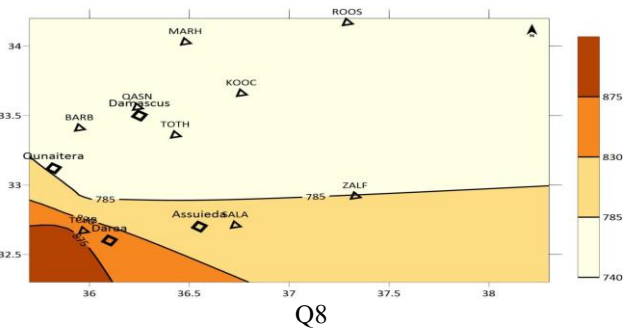
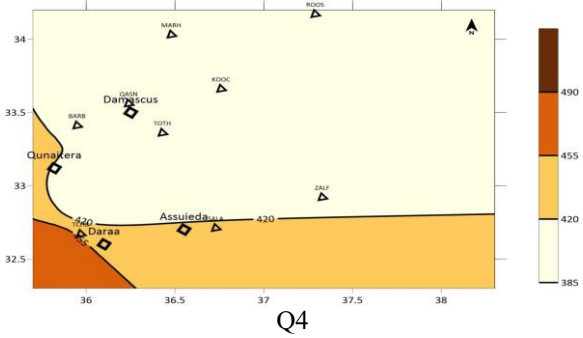
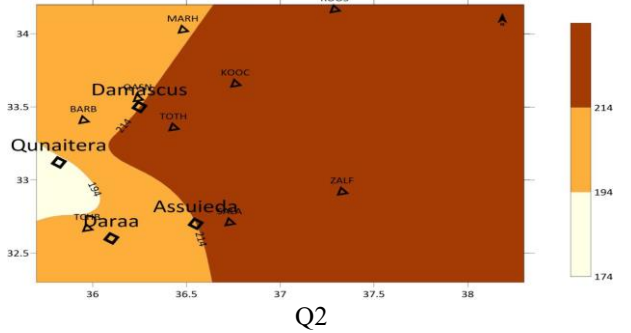
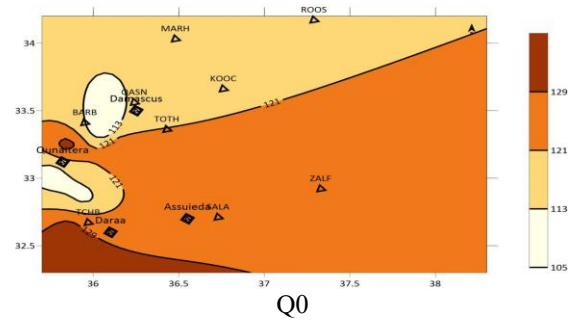
بعد رسم خرائط خطوط تسوية تغيرات معامل الجودة في منطقة الدراسة يمكن الحصول على قيم متوسط Q_0 و α من حسابات برنامج Seisan فتكون (130, 0.81) على التوالي. وبالتعويض بالشكل العام لمعادلة التخامد، تكون معادلة التخامد لمنطقة الدراسة كما يلي المعادلة(6):

$$Q_c = 130 \mp 26 \cdot f^{0.81 \mp 0.08} \quad (6)$$

كما يمكن توضيح معاملات ومعادلات خاصة بمجموعة من المحطات ضمن المنطقة ضمن الجدول(2):

شرف الدين، عمر وعبد الواحد

التخامد اللامرن للأمواج الجسمية في جنوب سورية



الشكل (3) خرائط كونتور معامل الجودة عند الترددات المركزية (من 1- 24) بالإضافة لخريطة تغيرات α

الجدول (2) قيم معادلات التخامد عند خمس محطات من المحطات المسجلة للأحداث المدروسة

اسم المحطة	معادلة التخامد
BARB	$Qc = 135 \mp 19 .f^{0.77 \mp 0.05}$
TCHB	$Qc = 122 \mp 13 .f^{0.85 \mp 0.04}$
TOTH	$Qc = 107 \mp 8 .f^{0.87 \mp 0.04}$
QASN	$Qc = 125 \mp 38 .f^{0.93 \mp 0.13}$
QNTR	$Qc = 114 \mp 23 .f^{0.93 \mp 0.11}$

تعتبر قيم Q0 المنخفضة عن المناطق ذات الجودة المنخفضة والتي تسود فيها التشوهات التكتونية العالية واللاتجانسات الليتولوجية الكبيرة وبالتالي تكون قيم التخامد عالية والعكس بالعكس.

لاحظت (محمد، 2012) أن قيم $LgQ0$ تراوحت بين 150-225 في المنطقة الجنوبية الغربية وهي منخفضة مقارنة بالمناطق الأخرى، ويعود ذلك إلى تغيرات في سماكة القشرة الأرضية وعمليات التشوه الصفيحية التي تؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة إضافة للانتشار الواسع للتوضعات البركانية، أما في المنطقة الجنوبية تصل قيمة Q0 إلى 300 في نطاق نهوض الرطبة وشرق الأردن [3]. يُعزى الانخفاض النسبي لـ Q0 في نطاقات التردد الأدنى إلى فقدان الطاقة بسبب وجود العديد من التباينات وانخفاض متانة الصخر. مقارنة قيم Q0 من البحث مع الدراسات السابقة، تعد قيم Q0 منخفضة مما يدل على تخامد عالي للأمواج، وخاصة في المنطقة الجنوبية الغربية بحيث تعد منطقة تشوهات تكتونية عالية خاصة بسبب قربها من نظم تصدع البحر الميت وانتشار الصخور البركانية (بقيمة Q0 تصل حتى الـ 100) وتزداد قيمة معامل الجودة باتجاه الجنوب (تصل حتى 130) والجنوب الشرقي لكون المنطقة الجنوبية أكثر استقراراً.

تكون المناطق الممتدة بالخريطة بأقل قيمة لمعامل الجودة (باللون الأبيض) هي المناطق ذات التشوهات التكتونية العالية، فتمثل الأولى منطقة جبل قاسيون (بشكل قطاع دائري) والثانية تمثل المنطقة الأقرب لصدع البحر الميت.

هاتان المنطقتان تتميزان بكونهما منطقتان جبليتان مليئة بالصدوع وهو ما يفسر القيم المنخفضة لمعامل الجودة وبالتالي تخامد الأمواج تكون أعلى ما يمكن بمقارنتها بباقي المنطقة المدروسة

إن قيم α المرتفعة تعبر عن ارتباط أكبر للتخامد بالتردد، (بعد الوصول لقيمة α في أنحاء منطقة الدراسة أكبر من 0.5). بينت (Giampiccolo, 2018) أن هذه النتيجة تعتبر ضمن القيم المتوقعة للمناطق شديدة التباين الليتولوجي، وشديدة التعقيد التكتوني، والنشطة زلزالياً [11]. يلاحظ ضمن المنطقة المدروسة قيمة منخفضة نسبياً لـ α من المنطقة المحيطة بالقنيطرة باتجاه الشرق (بمتوسط 0.81). وفي الجدول (3) مقارنة بين قيم Q0 و α بين هذه الدراسة ومجموعة من الدراسات حول العالم:

يظهر في الجدول (3) اختلافات كبيرة في قيم معاملات التخامد (Q0 و α) بين دراسات التخامد حول العالم، وتختلف هذه القيم مع اختلاف مناطق الدراسة وخصائصها التكتونية ومستوى عدم التجانس المنتشرة في كل منطقة.

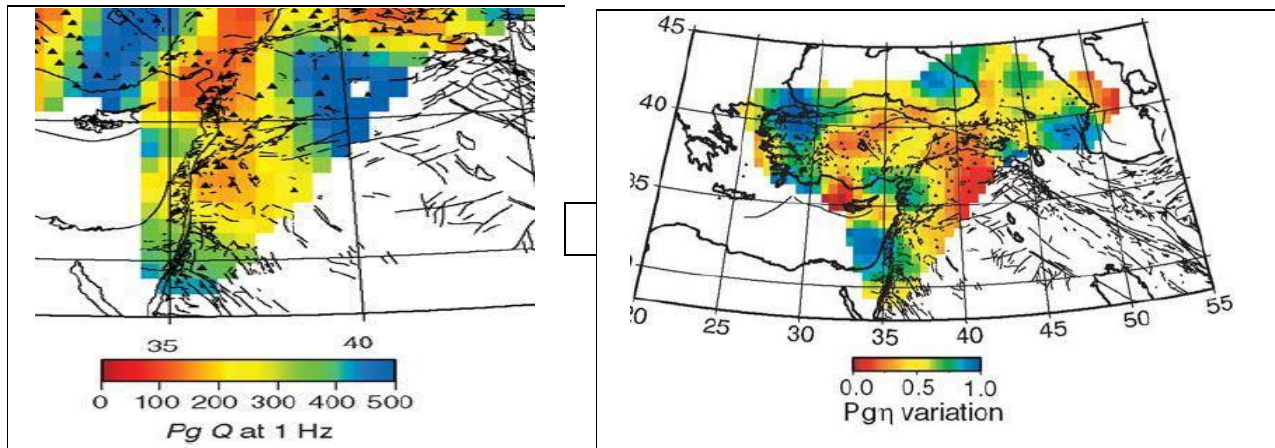
فيظهر في بحث ((Del Pezzo et al. (2015)) قيم منخفضة لـ Q0 تصل حتى (30) أما α وصلت حتى (0.5) [12]. ويعزو المؤلف ذلك إلى كون المنطقة المدروسة (منطقة بركان Etna) هي منطقة بركانية تتميز بتجانسات متنوعة متضمنة لنواتق باتجاهات مختلفة وتداخلات ماغماتية ضمن القشرة، ومصادر تدفقات حرارية وغيرها، تلعب دوراً هاماً في ارتفاع قيم التخامد في المنطقة وبالتالي قيم منخفضة لمعامل الجودة.

التخامد اللامر للامواج الجسمية في جنوب سورية شرف الدين، عمر وعبد الواحد
أما في (Parvez et al. (2008) كانت قيم معاملات التخامد (Q_0 و α) في المنطقة المدروسة (119 ، 0.9) على الترتيب ، وعل المؤلف ذلك إلى كون المنطقة ذات نشاط تكتوني عالي تسبب في كون التخامد عالي أيضاً [13].
من جهة أخرى كانت قيم معاملات التخامد (Q_0 و α) عند (Pulli (1984) (0.4 ، 460) مما يدل على قيم منخفضة للتخامد كون المنطقة المدروسة ذات نشاط تكتوني مستقر [14].

الجدول (3) دراسة مقارنة لقيم Q_0 و α مع مجموعة من النتائج الدراسات حول العالم، الجدول من (Giampiccolo, 2018)

Region	Q_0	α	Source
Southern Syria	130	0.81	هذه الدراسة
Mts. Peloritani (northeastern Sicily)	50	0.7	Giampiccolo.(2018)
Messina Strait (southern Italy)	76	0.5	Tuvè et al. (2006)
Southern Spain	86	0.8	Ibanez et al. (1990)
Almeria Basin (Iberian Peninsula)	63	0.9	Pujades et al. (1990)
Taiwan	93	0.8	Chung et al. (2009)
Pannonian Basin (Croatia)	120	0.7	Dasovic et al. (2013)
Eastern Himalaya	111	1.1	Singh et al. (2016)
Andaman Islands	119	0.9	Parvez et al. (2008)
Abu Dabbab (Egypt)	20	0.9	Abdel-Fattah et al.2008)
Washington State (USA)	63	0.9	Havskov et al. (1989)
Koyna (India)	96	1.1	Gupta et al. (1998)
Mt. Etna (Italy)	30	0.5	Del Pezzo et al. (2015)
Volcan de Colima (Mexico)	92	0.5	Domínguez et al. (2003)
Norway	120	1.1	Kvamme and Haskov (1989)
New England	460	0.4	Pulli (1984)
Northeastern Brazil	151	0.9	Dias and Souza (2004)

في مقارنة أخرى بين قيم Q_0 و α مع واحدة من الدراسات السابقة الشكل(4):



الشكل(4) تغيرات قيم PgQ و PgN في سوريا، الشكل من (Bao et al,2011)

تظهر تغيرات قيم Q_0 من بحث (Bao et al,2011) حيث يعبر مقياس اللون عن تنوع في القيم بحيث تتراوح بين (100-300) في جنوب سورية وتصل حتى (400) شمال الأردن [5]. ويتواصل تغييرها باتجاه الشمال فتكون بقيم حتى(300-500) في الجزء

التخامد اللامرّن للأمواج الجسميّة في جنوب سورية شرف الدين، عمر وعبد الواحد الشمالي الشرقي من سوريا. بما أن القيمة الوسطية لـ Q_0 في هذا البحث كانت بقيمة 130 (كما في المعادلة (6)) فالقيم المستحصلة متشابهة لقيم Q_0 من بحث (Bao et al,2011). أما بالنسبة لـ α تتراوح بين (0.5 - 0) في الشمال الشرقي وتتزايد باتجاه الشمال الغربي لتصل الى 1. أما جنوباً فتكون قيمتها بين (1-0.5) وهي قيمة قريبة من قيمة متوسط العامل α في هذا البحث (0.81).

6-الاستنتاجات:

وبذلك ينتج عن كل ما سبق:

1- استخراج قيم المعاملات الأساسية لتحديد التخامد (Q_0 و α) من عدد من التسجيلات الزلزالية والذي بلغ 31 حدث زلزالي في جنوب سوريا مسجل من 38 محطة بمجموع 210 تسجيل زلزالي وكانت قيم هذه المعاملات ($Q_0 = 130$) و ($\alpha = 0.81$). وبذلك تم الحصول على معادلة التخامد لمنطقة الدراسة:

$$Q_c = (130 \mp 26). f^{0.81 \mp 0.08}$$

2- نتيجة لرسم خرائط كونتورية لمعامل الجودة إضافة لـ α في منطقة الدراسة عند الترددات المركزية المدروسة وبعد مقارنتها بالدراسات السابقة في المنطقة مثل بحثي (Bao et al,2011) و (محمد، 2012) تبين أن النتائج في الأبحاث المذكورة متقاربة مع هذه النتائج — إلا أن الخرائط والتغيرات والنتائج في هذا البحث أكثر تفصيلاً، كونها تركز على منطقة صغيرة ضمن سورية مقارنة بالأبحاث التي تدرس مناطق واسعة قد تشمل كامل سورية مع محيطها.

3- توضيح علاقة تغير التخامد مع التردد بحيث أظهرت ارتباطاً وثيقاً وتغيراً شديداً لقيم التخامد مع تغير التردد، فكان معامل الجودة يزداد مع ازدياد التردد في المنطقة المدروسة مما دل على انخفاض التخامد مع ارتفاع التردد.

4- إن مناطق الارتفاعات الطبوغرافية والمناطق ذات التشوهات العالية في منطقة الدراسة تكون بأقل قيمة معامل الجودة، فتمثل الأولى منطقة جبل قاسيون (بشكل قطاع دائري) والثانية تمثل المنطقة الأقرب لصدع البحر الميت.

مثل البحث جزء مهم من خطوات تكامل حسابات التخامد ضمن سورية عامة وجنوب سورية خاصة، ويمكن تلخيص ما سبق بكون المنطقة المدروسة هي منطقة ذات تخامد عالي في الجنوب الغربي وبدرجات أقل بالنسبة لباقي المنطقة كما هو موضح في الخرائط المدروسة، كما يلعب التخامد دوراً هاماً إذ يتوضح ارتباط التخامد بشكل وثيق بالتردد من خلال تغيرات التخامد الظاهرة عند الترددات المركزية المختلفة المقروءة.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

Referances:

1. Padhy, S., Subhadra, N. & Kayal, J, R.,2011. Frequency-Dependent Attenuation of Body and Coda Waves in the Andaman Sea Basin, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 1, pp. 109–125.
2. Havskov J, Malone S, McCloug D, Crosson R (1989) Coda Q for the state of Washington. Bull Seismol Soc Am 79:1024–1038.
3. محمد، رندة سعد الدين (2012) تخامد الأمواج الزلزالية المحلية والإقليمية في سورية والمناطق المجاورة. رسالة دكتوراه، جامعة دمشق، دمشق .
4. قنواتي، نور. (2024) _النشاط السائزيمي في منطقة القلمون باستخدام التسجيلات المستمرة لمحطات المركز الوطني للزلازل وشبكة جامعة دمشق. رسالة ماجستير، جامعة دمشق، دمشق.
5. Bao ,X. , Sandvol ,E. , Zor, E. , Sakin, S. , Mohamad ,R. , Gök ,R. , Mellors, R. , Godoladze ,T. , Yetirmishli ,G. , Türkelli ,N. ,(2011) , Pg attenuation tomography within the Northern Middle East . Bull . Seismol . Soc . Am . , 101 (4) : 1496-1506 . doi : <https://doi.org/10.1785/0120100316>
6. Sandvol , E. , Al – Damegh, K. , Calvert, A. , Seber, D. , Barazangi, M. , Mohamad, Rle East , Pure Appl . Geophys . 158 , 1121-1163 .
7. حسين، كمال محي الدين(2012) جيولوجية سورية الإقليمية (1) (ط: 3) دمشق: مطبعة جامعة دمشق.
8. Havskov, J. Sørensen, M, B. Vales, D. Özyazıcıoğlu, M. Sánchez, G. & Li, B. (2016) Coda Q in Different Tectonic Areas, Influence of Processing Parameters. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 3. doi: 10.1785/0120150359
9. Kumar, C. H. P., Sarma, C. S. P., Shekar, M., & Chadha, R. K. (2006). Attenuation studies based on local earthquake Coda waves in the southern Indian peninsular shield
10. Havskov, J., and L. Ottemöller (1999). SEISAN earthquake analysis software, Seismol. Res. Lett. 70, 532–534.
11. Giampiccolo, E., & Tuvè, T. (2018). Regionalization and dependence of coda Q on frequency and lapse time in the seismically active Peloritani region (Northeastern sicily, italy). Journal of Seismology, 22(4), 1059–1074. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9750-0>
12. Del Pezzo E, Bianco F, Giampiccolo E, Tusa T, Tuvè T (2015) Areappraisal of seismic Q evaluated at Mt. Etna volcano.Receipt Application Risk Analysis J Seismol 19:105–119.<https://doi.org/10.1007/s10950-014-9453-0>
13. Parvez IA, Sutar AK , Mridula M,Mishra SK, Rai SS (2008) Coda Q estimates in the Andaman Islands using local earthquakes.Pure Appl Geophys 165:1861–1878
14. Pulli JJ (1984) Attenuation of coda waves in New England. Bull Seismol Soc Am 74:1149–1166