

تقدير النظام التكتوني باستخدام مستويات الحلول الصدعية في المنطقة الساحلية في سوريا

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

ملخص

يهدف هذا البحث إلى إجراء تقدير أولي للنظام التكتوني في المنطقة الساحلية باستخدام مستويات الحلول الصدعية لآلية البؤرة الزلزالية لأكبر الهزات المسجلة بالشبكة الوطنية للرصد الزلزالي خلال الفترة 1995-2011. تم الحصول على حلول آلية البؤرة الزلزالية لحوالي 42 حدث زلزالي يملك كل منها خمس قطبيات (أول حركة) للموجة الطولية (P) على الأقل. كان النظام التكتوني لمعظم هذه الأحداث نظام شدي أدى لظهور آلية التصدع العادي بتوافق مع المظاهر المحلية للصدوع المولدة للزلازل في المنطقة الساحلية. وإحصائياً تدل النتائج على ظهور التصدع العادي النقي في حوالي 65% من آليات البؤرة المحسوبة وعلى ظهور التصدع العادي مع وجود مركبة أصغرية للإزاحة الجانبية في 8% من الآليات المحسوبة، وبالنتيجة فإن آلية التصدع العادي قد ظهرت في 73% من الهزات الأرضية المعالجة. بينما كانت آلية الإزاحة الجانبية أكثر ندرة ومحصورة في بعض المناطق. إن نتائج هذا البحث تخالف الدراسات الجيولوجية والتكتونية السابقة والتي تنبأت أن إجهاد التصدع العكسي يجب يكون مسيطراً.

الكلمات المفتاحية: مستويات الحلول الصدعية، النظام التكتوني، المنطقة الساحلية،

سورية

using the fault Tectonic regime outlining plan

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

(1)Higher Institute of Earthquake studies and Research, Damascus university E-mail: mohammed.alissa11985@gmail.com;

(2) National Earthquake Center (NEC).

Abstract

The aim of this study was to outline the tectonic regime in the coastal region of Syria using the fault plan solutions of the largest events recorded by the Syrian National Seismological Network during 1995-2011. A dataset of fault-plane solutions was obtained for 42 events having at least 5 P-wave polarities. The tectonic regime for the most of these events was extensional and produce normal mechanisms in agreement with the local configurations of the seismogenic faults in the coastal region. Statically, the results reveal that the pure normal faulting appears in 65% of the calculated focal mechanisms; and the normal faulting with a minimal strike-slip component appears in 8% of them. Consequently, the normal faulting appears in 73% of the processed earthquakes. However, the strike-slip mechanisms were more scarce and restricted to certain areas. The results of this research are in contrast with previous geological and tectonic studies which predict a thrust faulting stress regime should be prevailing.

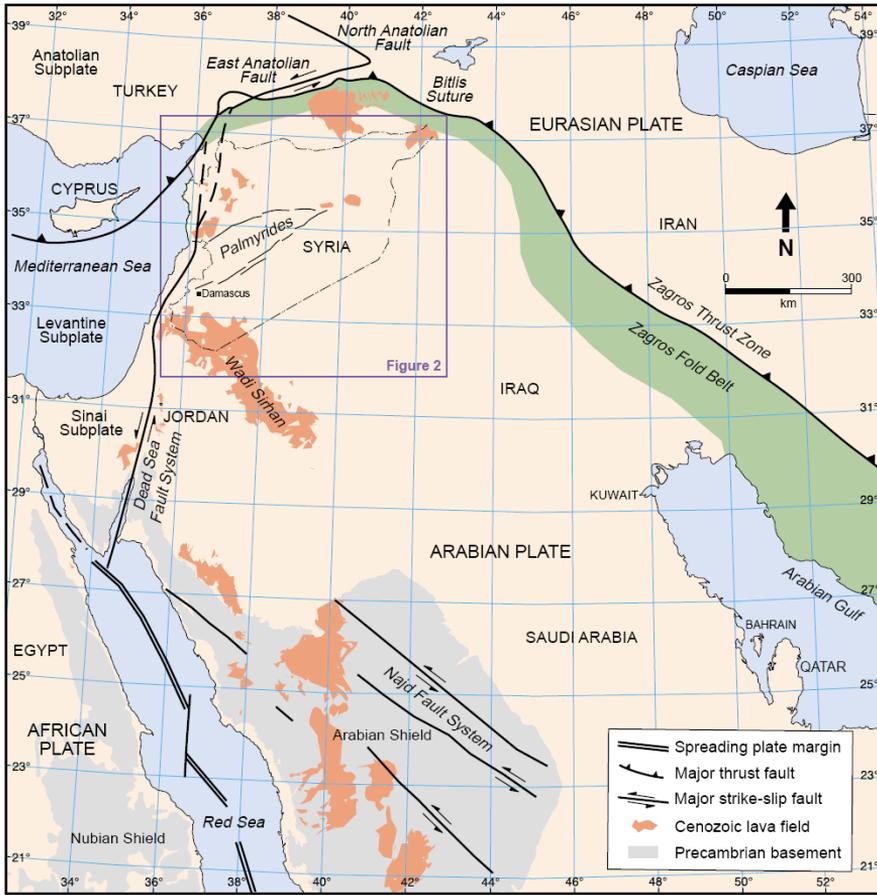
Keywords: fault plan solutions, tectonic regime, coastal region, Syria.

1- مقدمة

تقع سورية في الطرف الشمالي من الصفيحة العربية (الشكل 1) ويحدها من الغرب الجزء الشمالي من نظام صدع البحر الميت. يتقاطع هذا النظام في شمال المنطقة الساحلية قرب مدينة أنطاكية مع نظام صدع الأناضول الشرقي والذين يشكلان الحدود الشمالية الغربية للصفحة العربية ويظهران بوضوح في خارطة التكتونيك الحديث لسورية (Rukieh et al. 2005). أظهرت الدراسات السابقة أن التشوهات التكتونية في سورية عموماً (e.g Barazangi et al. 1993) تتحكم بها عمليات تصادم-انفتاح متكررة وتحركات عند أطراف الصفيحة العربية (الشكل 1). وقد شرحت الدراسات السابقة لآلية البؤرة، للأحداث الزلزالية التي وقعت في سورية، أن التشوهات النشطة حالياً ذات مظهر إزاحة يسارية مع مركبة أصغرية للتصدع العادي ويرافق هذه التشوهات أحواض شديدة تمزقية على طول نظام صدع البحر الميت (Garfunkel et al. 1981, Chaimov et al. 1990, Barazangi et al. 1993). بناء على ما سبق تعتبر المنطقة الساحلية من المناطق الأكثر نشاطاً في سورية من الناحيتين التكتونية والزلزالية وجديرة بالاهتمام لتنفيذ دراسات علمية تفصيلية لهذا النشاط وما يحمله من مخاطر.

يهدف هذا البحث إلى تقدير النظام التكتوني في المنطقة الساحلية باستخدام مستويات الحلول الصدعية لأكبر الهزات التي سجلتها الشبكة الوطنية السورية للرصد الزلزالي وصولاً إلى تقييم النشاط التكتوني الحديث على امتداد الصدوع النشطة في تلك المنطقة. وإذا أخذنا بالحسبان أن دورة تكرار الزلازل الكبيرة ($M \geq 5$) في سورية والتي تُعتبر طويلة نسبياً حسب ما قدرها (Ambraseys and Barazangi, 1989) بحوالي 200-350

سنة، يمكن لنا أن ندرك سبب ظهور بعض الصدوع غير نشطة زلزالياً خلال فترة البحث. لقد تم التركيز في هذا البحث على حساب آلية البؤرة لعدد من الهزات الأرضية التي سجلتها الشبكة الوطنية السورية للرصد الزلزالي والتي يملك كل منها خمس قطبيات (أول حركة) للموجة الطولية (P) على الأقل وذلك بحيث تكون صالحة نسبياً لحساب آلية البؤرة وقابلة للمقارنة مع الصدوع الرئيسية في المنطقة الساحلية.



شكل 1. خريطة تكتونية إقليمية لشمال الصفيحة العربية وجوارها تظهر قرب سورية من عدة حدود صفائحية نشطة. (معدلة عن Brew et al. 2001). يعرض المربع موقع الشكل 2.

2- النشاط الزلزالي الحديث في سورية

بدأت الشبكة الوطنية السورية للرصد الزلزالي عملها في 14 كانون الثاني 1995 حسب (Dakkak et al. 2005). وتتألف هذه الشبكة من 27 محطة قصيرة الدور (1 Sec) وقد زودتنا بمعطيات الزلزالية الآلية المحلية لأول مرة في سورية. كان الهدف التصميمي لهذه الشبكة رصد كل نشاط زلزالي قابل للتمييز على طول نظام صدع البحر الميت وفروعه في سورية ولبنان (الشكل 1). ويمكن أن نجد معلومات تفصيلية حول هذه الشبكة مثل نظام التحصيل والنقل والمعالجة والتسجيل في المرجع (Dakkak et al. 2005). سجلت الشبكة الوطنية السورية للرصد الزلزالي حوالي 5000 حدث محلي منذ تأسيسها في كانون الثاني 1995 ولغاية 2001 (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 ($M_L < 4$) 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. 1990, Barazangi et al. 1993, Brew 2001), حيث أظهرت تسجيلات الشبكة الوطنية للرصد الزلزالي أن هذا النشاط ينتج سنوياً عدداً قليلاً من هزات منخفضة القدر مقارنة مع الدول المجاورة. تبين الدراسات السابقة المتعلقة بآلية البؤرة للأحداث الزلزالية التي وقعت

3- منطقة الدراسة

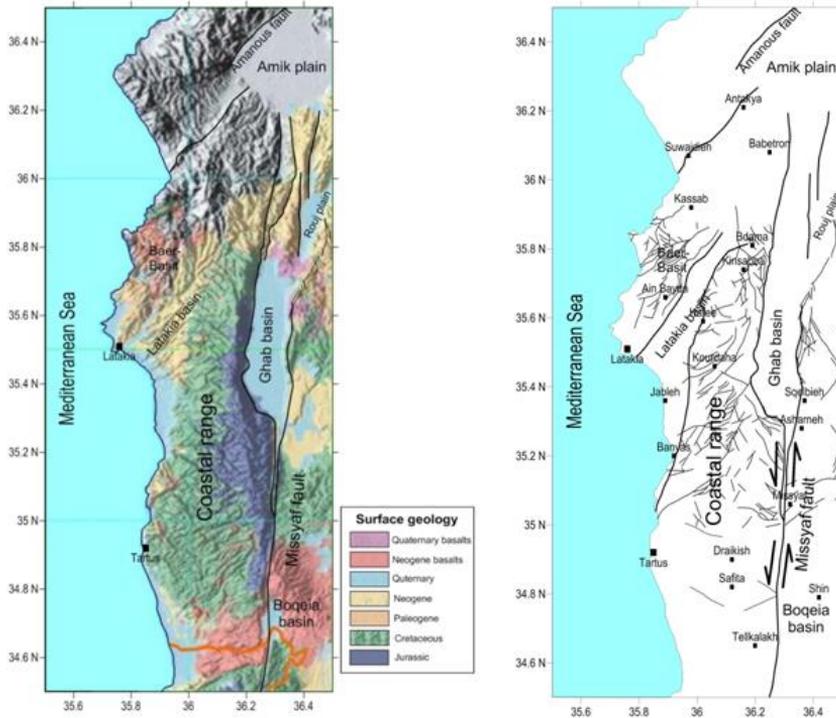
تم تحديد منطقة الدراسة بين خطي عرض 34.5 و 36.5 شمالاً وخطي الطول 35.5 و 36.5 شرقاً (الشكلان 2 و 3). تتضمن هذه المنطقة نظامين صدعيين إقليميين هما نظام صدع البحر الميت (DSFS: Dead Sea Fault System) ونظام صدع الأناضول الشرقي. وتتكون هذه المنطقة بنيوياً من قسمين: القسم الشرقي ويشمل منخفض الغاب ومصيف والتي بينت الدراسات الحديثة (Barazangi et al. 1993, Brew et al.) (2001) أنها أحواض تمزقية (Pull apart) والقسم الغربي الذي يشمل سلسلة الجبال الساحلية. تطرقت الدراسات السابقة إلى دراسة البنيات التكتونية وحركتها تحت تأثير نظام صدع البحر الميت عليها (Al-abdalla, 2008). وتمّ وضع العديد من الخرائط الأساسية للمنطقة منها خريطة التوضعات الرباعية والخريطة الجيومورفولوجية وخريطة التكتونيك الحديث (Trifonov et al., 2012; Trifonov, 1991). وقام العبد الله (Al-abdalla, 2010) بدراسة التطور التكتوني للسلسلة الساحلية منذ الميزوزوي وحتى الوقت الحالي.

يعمل نظام صدع البحر الميت على احتواء الحركة التفاضلية للصفحتين العربية والإفريقية حيث يبلغ مقدار الحركة النسبية على امتداد هذا الصدع حوالي $(18 \pm 2 \text{ mm})$ تقريباً بالسنة حسب (McClusky et al., 2000). يدخل نظام صدع البحر الميت الأراضي السورية في جنوب منطقة الدراسة عبر صدع مصيف ذو الاتجاه شمال-جنوب والذي يتفرع إلى صدعين يتباعدان عن بعضهما كلما اتجهنا شمالاً ليشكلا حوض الغاب الذي ترتفع حافته الغربية إلى 1200م فوق قاعه وقد أظهرت الآبار المحفورة ونتائج

الدراسات الجيوفيزيائية أن الإزاحة الشاقولية الأعظمية لصدع الغاب الغربي تصل إلى 2500 م (Devyatkin et al. 1997). أما الحافة الشرقية لحوض الغاب فترتفع إلى 600 م فوق قاعه وقد قدرت الدراسات السابقة أن الإزاحة الشاقولية الأعظمية لصدع الغاب الشرقي لا تزيد على 1500 م (Devyatkin et al. 1997). ويرافق هذه الصدوع الضخمة مجموعة من الصدوع الجانبية والتي تنتشر على الحافة الغربية وتقطع سلسلة الجبال الساحلية (الشكل 3). تتخادم الصدوع المشكلة لحوض الغاب في الشمال قرب بحيرة العمق. تمتد سلسلة الجبال الساحلية إلى الغرب من صدعي مصياف والغاب الغربي وهي عبارة عن بنية كتلية ناهضة مرتبطة بنظام صدوع البحر الميت الانزاحية حيث يتميز جناحها الشرقي بانحداره الشديد وبنيته السلمية. يقطع المناطق الناهضة من هذه السلسلة مجموعة من الصدوع الثانوية المتجهة نحو الجنوب الغربي وقد يمتد بعضها في البحر. أما نظام صدع الأناضول الشرقي فيقع في شمال منطقة الدراسة ويعتبر منطقة انتقالية بين الصفيحة العربية وبين نطاق الطي الألبى الممتد في شمال هذا النظام والمتمثل بسلسلة جبال طوروس ويحده من الجنوب الشرقي منظومة صدوع اللاذقية-كلس. ويختلف نظام صدع الأناضول الشرقي اختلافاً ملحوظاً في بنيته المعقدة وتاريخ تطوره عن بنيات المنحدر الشمالي للصفيحة العربية وتتكشف فيه الركيزة البلورية على السطح. تقسم امتدادات نظام صدع البحر الميت المتجهة بالاتجاه شمال-جنوب هذا النطاق إلى منطقتين البسيط والكرد-داغ.

تقع منطقة البسيط إلى الغرب من منظومة صدوع اللاذقية-كلس ويحدها من الشمال مجرى العاصي الأسفل أما من الجنوب الشرقي فيحدها منخفض الكبير الشمالي والمرتبطة بنظام صدوع اللاذقية-كلس. يقطع منطقة البسيط العديد من الصدوع ذات الاتجاه العام

شمال شرق-جنوب غرب ، وتنتمي إلى المنظومة اللاذقية-كلس بالإضافة إلى صدوع جانبية متقاطعة معها. يظهر النشاط الزلزالي بوضوح على امتداد تلك على الصدوع ونذكر منها صدع يمتد من جنوب أوردو إلى جنوب البدرسية، ويستمر في البحر بالاتجاه الجنوب الغربي. وهناك محور ثان له نفس الاتجاه ويمتد من قرب دركوش، شمال بداما، الرابية، بلوران ويستمر في البحر بالاتجاه الجنوب الغربي. وثمة محور ثالث يوافق صدع عين البيضاء ويستمر في البحر بالاتجاه الجنوب الغربي. يشكل صدع النهر الكبير الشمالي الحدود الجنوبية لمنطقة البسيط.

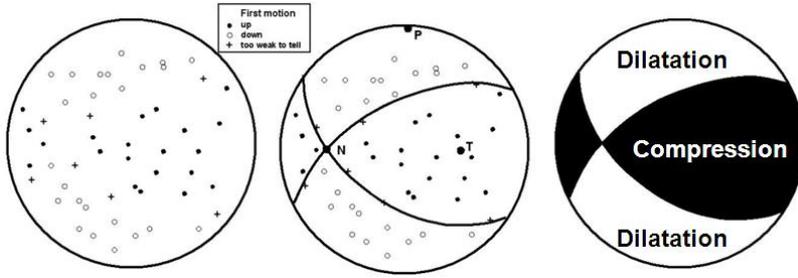


شكل 3: خارطة جيولوجية مبسطة لمنطقة الدراسة (على اليسار) وخارطة لأهم الصدوع والمدن (على اليمين).

تأثرت منطقة الدراسة من الناحية التكتونية بفعل حركتين وهما: حركة التطور البنيوي للسلسلة الساحلية ممثلة بالمناطق الواقعة إلى الجنوب من نهر الكبير الشمالي وبعيداً عنه باتجاه الشرق والجنوب الشرقي، والحركات التكتونية الألبية ممثلة بالمناطق الواقعة إلى الشمال والشمال الغربي من نهر الكبير الشمالي، حيث تتفصل الحركتين بالمنخفض النيوجيني لنهر الكبير الشمالي وبنظام صدوع اللاذقية-كلس (Trifonov, 1991).

4- الطرائق المستخدمة

إن العديد من الملاحظات قد سمحت بالوصول إلى آلية البؤرة الزلزالية (Seismic focal mechanism) للهزات الأرضية اعتباراً من التسجيلات الزلزالية المتولدة عنها (Lay and Wallace 1995). وبشكل عام فإنه في حالة شبكات الرصد ذات الكثافة الكافية والتوزيع الجغرافي المنتظم لمحطات الرصد حول المنبع الزلزالي والذي يضمن تغطية جميع زوايا السمات حول البؤرة الزلزالية فإن قطبية الموجة الطولية (P) تعتبر كافية لتحديد آلية البؤرة الزلزالية. وقد اصطلح أن قطبية الموجة الطولية (P) موجبة إذا كانت أول حركة (First motion) نحو الأعلى فتوصف بأنها انضغاطية ويرمز لها ب) C: (compression) كما اصطلح أن قطبية الموجة الطولية (P) سالبة إذا كانت أول حركة نحو الأسفل فتوصف بأنها تمددية ويرمز لها ب) (D: dilatation). إن عزل القطبيات الموجبة عن القطبيات السالبة يسمح بتحديد مستويي الحلول لآلية البؤرة الزلزالية واللذين يسميان اصطلاحاً المستويان العقديان (الشكل 4).



شكل 4: المبدأ المبسط لحساب آلية البؤرة الزلزالية حيث تمثل الدوائر الصغيرة المفرغة القطبيات التمديدية أما الدوائر الصغيرة المصمتة فتمثل القطبيات الانضغاطية.

قام (Snoke et al., 1984) بإعداد البرنامج (FOCMEC) لحساب آلية البؤرة الزلزالية بالاعتماد على قطبية الموجة الطولية (P) وعلى نسبة السعة (SV/P) (حيث يشير الرمز P لسعة الموجة P و يشير الرمز SV لسعة المركبة الشاقولية للموجة S) وقد طور (Hardebeck and Shearer, 2002, 2003) في برنامجهما (HASH) تلك التقنية فوسعاها لتستخدم نسبة السعة (S/P) ولتأخذ بعين الاعتبار جميع مصادر الخطأ المؤثرة بحيث تكون آلية البؤرة المحسوبة أكثر استقراراً. لكن (Reasenber and Oppenheimer, 1985) استخدموا قطبية الموجة الطولية (P) فقط في إعداد البرنامج الحاسوبي (FPFIT) والذي يجري بحثاً شبكياً لأفضل توافق بين المستويين العقدين والقطبيات الملاحظة. أما (Suetsugu, 1998) فقد اعتبر في برنامجه (PINV) أن قطبيات الموجة الطولية (P) إما أن تكون $1+$ أو $1-$ كقيم سعوية عظمى وصغرى على التسلسل وقام بإجراء عملية قلب مصفوفة العزوم (Moment tensor inversion) لإيجاد مزدوجة القوى دون إعطاء أي تقدير للخطأ للحكم على مدى موثوقية حلول

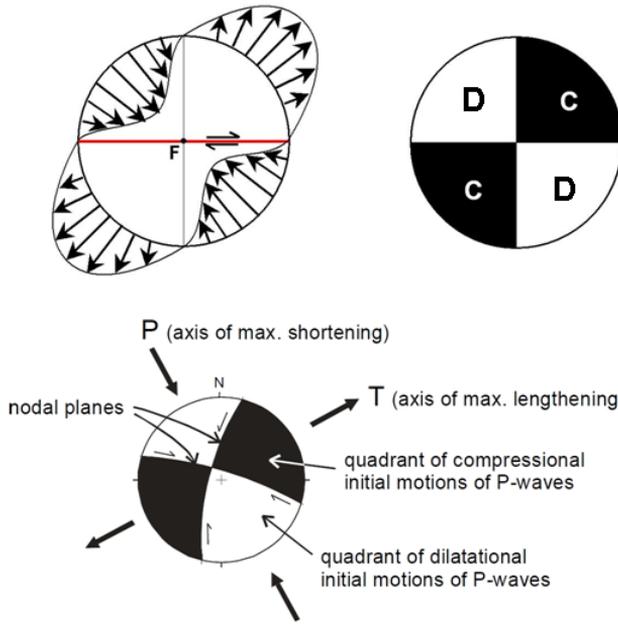
المستويات الصدعية (Fault plane solutions) . قام (Abdul-wahed, 2018b) بإعداد البرنامج (MECA3) باستخدام الطريقة الاحتمالية (Zollo and Bernard, 1991) لحل المسألة العكسية بشكل غير خطي للوصول لآلية البؤرة الزلزالية. تحسب احتمالية معاملات المستويات الصدعية بالاعتماد على مجموعة المعطيات الملاحظة (مثل قطبية الموجة الطولية P المسجلة في عدد كافي من محطات الرصد الزلزالي) باستخدام مقاربة (Bayesian) التي تأخذ بالحسبان شكل دالة كثافة الاحتمالية كما عرفها (Brillinger et al., 1980). يقوم البرنامج بتقدير احتمالية معاملات نموذج آلية البؤرة من خلال بحث شامل لجميع الزوايا الممكنة لحلول المستويات الصدعية. تمثل حلول الاحتمالية العظمى حلول المستوي الصدعي والمستوي المساعد. يسمح البرنامج (MECA3) بعرض حلول آليات البؤرة المحسوبة ببرامج أخرى بهدف مقارنتها مع بعضها كما يسمح بتصنيف آلية البؤرة حسب (Zoback, 1992) واستنتاج النظام التكتوني واتجاه محور الإجهاد الأفقي الأعظمي ($S_H \max$) (Abdul-Wahed and Alissa, 2020).

تفترض البرامج السابقة أن المنبع الزلزالي من النموذج النقطي وذو آلية ثنائية مزدوجة القوى وأن موقع البؤرة الزلزالية محدد بدقة وأن معاملات آلية البؤرة الزلزالية هي الاتجاهات الزاوية للصدع (السمت والميل والانزلاق) حسب ما عرفها (Aki and Richards 1980) حيث تمثل مستويات الحلول بأخذ مسقط تقاطعها مع النصف السفلي للكرة البؤرية. قام (Salamon et al., 2003) بحساب آلية البؤرة للزلازل التي قدرها المحلي ($ML \geq 4$) المسجلة في منطقة شرق المتوسط خلال القرن العشرين باستخدام البرنامج الحاسوبي (FPFIT) ووجد أن الحلول الشاذة تؤكد على مدى تعقد

عمليات التشوه على طول نظام صدع البحر الميت. كذلك استخدم هذا البرنامج (Bräuer, 2011) لحساب آلية البؤرة الزلزالية لحوالي 30 حدث زلزالي محلي وقعت في حوض البحر الميت.

5- تصنيف النظام التكتوني

من الشائع أن تستخدم آلية البؤرة الزلزالية في الاستدلال على اتجاهات حقل الإجهاد الحالي في القشرة الأرضية وتحديد اتجاه الحركة الحالية للصفائح التكتونية. لقد تنبأت المبادئ النظرية لمحاور الإجهاد أنه عند تعريض عينات صخرية للإجهاد فإن سطوع التمزق سوف تحدث بزاوية 45 درجة مع اتجاه الإجهاد الأعظمي واتجاه الإجهاد الأصغري وأكدت ذلك التجارب المخبرية. وبشكل مكافئ لذلك فإن المستويان العقديان لآلية البؤرة يحددان اتجاهات محاور التشوه: محور الانضغاط الأعظمي (موجب) يقع في منتصف الربع التمددي ويسمى محور الضغط (P: compression axis) ويظهر وفقه تشوه التقصير الأعظمي (max shortening) ومحور التمدد الأعظمي (سالبة يعبر عن الشد) يقع في منتصف الربع الانضغاطي ويسمى محور الشد (T: tension axis) ويظهر وفقه تشوه التطاول الأعظمي (max lengthening) (الشكل 5). أما محور التشوه الوسيط (أو الحيادي) والذي يعامد المحورين السابقين ويرمز له ب (B or null axis) فسيكون ناتجاً عن تقاطع المستويين العقديين ولا يحدث تشوه وفقه.



شكل 5: المبدأ المبسط لتحديد محاور التشوه في البؤرة الزلزالية.

بما أن محاور الإجهاد في القشرة الأرضية تأخذ الاتجاهات الشاقولية والأفقية (S_V, S_H) هو (S_V) الذي يحدد النظام التكتوني (Tectonic regime) فإذا كان هذا المحور الشاقولي أصغرياً أي محوراً للشد (T) كان هذا النظام انضغاطياً (compressional) وسيطرت فيه آلية التصدع العكسي وتحققت العلاقة ($S_H \max > S_h \min > S_V$)، وإذا كان المحور الشاقولي أعظماً أي محوراً للضغط (P) كان هذا النظام تمديداً (extensional) وسيطرت فيه آلية التصدع العادي وتحققت العلاقة ($S_V > S_H \max > S_h \min$)، أما إذا كان محوراً وسطياً أي محوراً حيدياً (B) فسيكون هذا النظام تمزقياً شديداً وسمي (wrench)

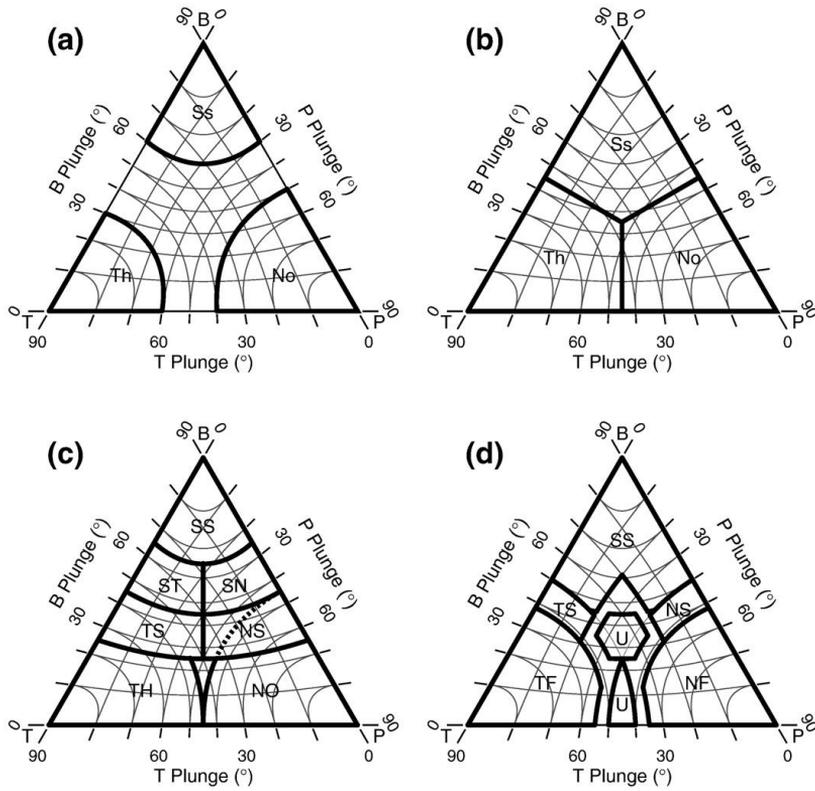
وسيطرت فيه آلية الإزاحة الجانبية الأفقية وتحققت العلاقة ($S_H \max > S_V > S_h \min$). يعتبر تصنيف (Anderson, 1951) للنظام التكتوني بسيطاً ولا يغطي جميع الحالات ولكنه مفيد من أجل التصنيف الأولي لهذا النظام (Simpson, 1997; Hardebeck) (and Michael, 2006).

استخدمت زوايا ميل (التغريق) محور الضغط (P) ومحور الحياضي (B) ومحور الشد (T) للاستدلال على الأنظمة التكتونية المولدة للزلازل وقد استخدم الباحثون المقاربتان التاليتان: (1) أنه من الممكن اعتبار المحاور الثلاثة (P, B, T) على أنها الاتجاهات الرئيسة للإجهاد بشكل تقريبي؛ (2) أنه من الممكن اعتبار المحاور الثلاثة (P, B, T) على أنها مؤشرات على شعاع الانزلاق الصدعي وبالتالي يمكن أن تستخدم لتصنيف الحركة الصدعية. أدخل (Frohlich, 1992) مخططاً بيانياً ثلاثي الأبعاد لتمثيل زوايا ميل المحاور الضغط والحياضي والشد (P, B, T) بنقطة واحدة داخل المثلث البياني مما سمح بإجراء معاينة بصرية لتلك المقاربات. لقد وجد (Célérier et al., 2012) أن المحاور الثلاثة (P, B, T) تزودنا بتقديرات معقولة لاتجاهات محاور الإجهاد في حالة أن محاور الإجهاد الرئيسة كانت شاقولية أما في الحالات الأخرى فإنه من الأفضل تفسيرها كتعبير عن هندسة الصدع والانزلاق الصدعي. قدم (Frohlich, 1992; 2001;) (Frohlich and Apperson, 1992) التصنيف الأبسط للنظام التكتوني بناء على الميل الأصغري للمحاور الثلاثة (P, B, T) وميّر الأصناف الثلاث السابقة (الشكل 6) لكن هذا التصنيف ترك مساحة واسعة من المثلث البياني دون توصيف. وقدم (Kagan,) (2002; 2005) تصنيفاً بسيطاً يعتمد على المحور ذو الميل الأعظمي وشمل هذا

التصنيف معطيات أوسع. عرض (Triep and Sykes, 1996; 1997) تصنيفاً أكثر اكتمالاً بهدف الحصول على تصنيف أدق للانزلاقات الصدعية المائلة (oblique slips). وقدم (Zoback, 1992) تصنيفاً يعتمد على ميل المحور الحيايدي (B) واستخدمه في خارطة الإجهاد العالمية (World Stress Map).

6- جودة المعطيات

أدت الزلزالية المنخفضة في سورية وعدم كفاية تغطية محطات شبكة الرصد كما ورد في المرجع (Dakkak et al. 2005) إلى الحد من عدد حلول المستوي الصدعي التي يمكن الحصول عليها في منطقة الدراسة. لذلك فقد تفحصنا بدقة كل المعطيات المتوفرة وكذلك موثوقية الحلول بهدف الحصول على أكثر ما يمكن من المعلومات منها. بما أن غالبية الأحداث الزلزالية المسجلة في سورية كانت أحداث ضعيفة (Abdul-Wahed and Al-Tahan 2010, Abdul-Wahed et al., 2011; Abdul-Wahed and Asfahani, 2018) فقد اعتبرنا جميع الأحداث المحلية التي تمتلك خمسة قطبيات للموجة P كحد أدنى صالحة لحساب آلية البؤرة الزلزالية. طبقاً لذلك فإن مجموعة مختارة مكونة من 42 حدث وقعت داخل منطقة الدراسة كانت معتبرة كأحداث رئيسة صالحة لتحليل قطبية الموجة الطولية (P).



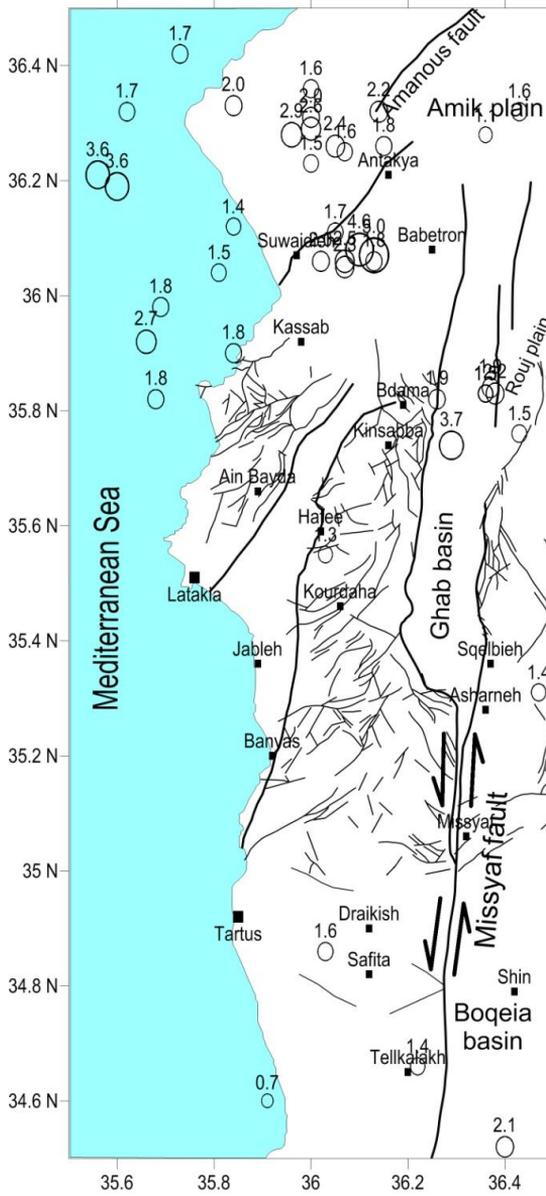
شكل 6. مخطط فروليش (Frohlich, 1992) الأساسي لتصنيف الأنظمة التكتونية حسب زوايا ميل محاور التشوه الضغط والمحايد والشد (P, B, T) وهو معروض بالرمز (a) وثلاثة نسخ مطورة منه والرموز المستخدمة بالأشكال هي: (a) Thrust (Th), strike-slip (Ss), and normal (No) regimes as defined by Frohlich and Apperson (1992) and Frohlich (1992, 2001). (b) Thrust (Th), strike-slip (Ss), and normal (No) regimes as defined by Kagan (2002, 2005). (c) Thrust (TH), thrust and strike-slip (TS), strike-slip and thrust (ST), strike-slip (SS), strike-slip and normal (SN), normal and strike-slip (NS), and normal (NO) regimes as defined by EPRI (1994) and reported by Triep and Sykes (1996, 1997). d) Thrust faulting (TF), thrust and strike-slip (TS), strike-slip (SS), normal

and -slip (NS), and normal faulting (NF) regimes as defined by Zoback (1992) and used in the World Stress Map.

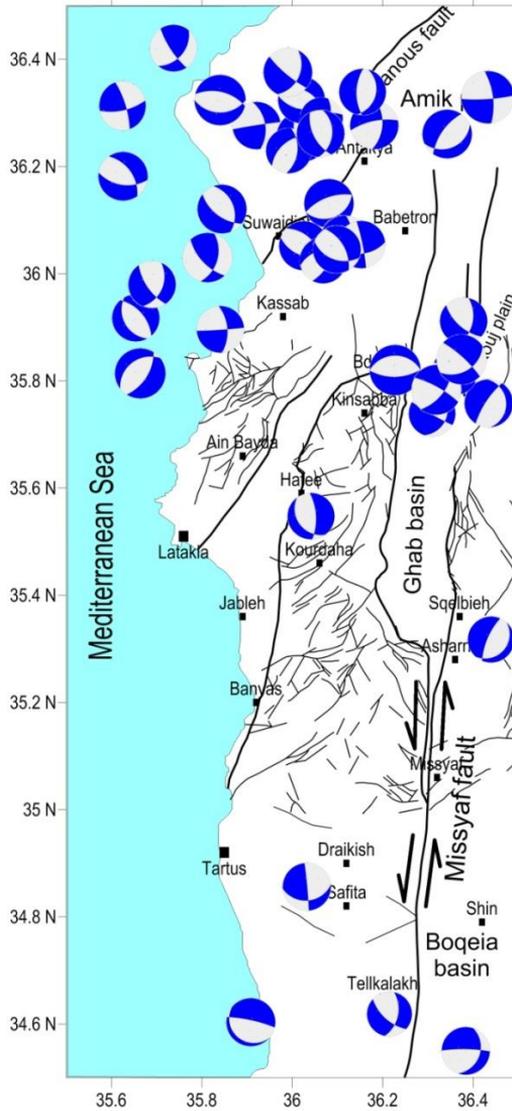
تمت معالجة المجموعة المختارة من الهزات باستخدام الأدوات البرمجية التي يقدمها البرنامج Seisan 10.3 بدءاً من عرض الشكل الموجي وتحديد أزمنة الوصول وحتى الحصول على آليات البؤرة الزلزالية. يعتبر التحديد الدقيق لموقع البؤرة عاملاً حاسماً في التميز الموثوق لمعاملات التصدع ويهدف تحسين الدقة في الأحداث المختارة طبقاً للتصفية الرقمية على التسجيلات لتحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج وقمنا بتحديد جميع أطوار الموجتين P و S يدوياً. ونتيجة لذلك فقد زاد عدد قراءات أزمنة الوصول. ثم قمنا بإعادة تحديد مواقع البؤر باستخدام أزمنة الوصول الجديدة ونفس النموذج السري المستخدم في الشبكة الوطنية السورية للرصد الزلزالي. يعرض الشكل 7 توزيع البؤر السطحية للأحداث الزلزالية المعتبرة صالحة لدراسة آلية البؤرة ضمن منطقة الدراسة.

7- النتائج

تم تطبيق برمجيات آلية البؤرة المذكورة أعلاه والتي يقدمها البرنامج Seisan 10.3 على الأحداث المختارة. كان لأغلب هذه الأحداث آلية التصدع العادي بتوافق مع البنيات الصدعية المحلية أما آلية الإزاحة الجانبية فكانت أكثر ندرة (بضعة أحداث فقط) ومحصورة في بعض المناطق مثل الامتداد الشمالي لصدع الغاب. كما لوحظت آلية التصدع العكسي في حدثين فقط وقعا في البحر. يعرض الشكل 8 مظاهر آليات البؤرة الزلزالية المحسوبة من أجل المجموعة المختارة من الهزات المسجلة في المنطقة الساحلية من سورية. يعكس هذا المظهر البنيات المحلية المولدة للزلازل في تلك المنطقة.

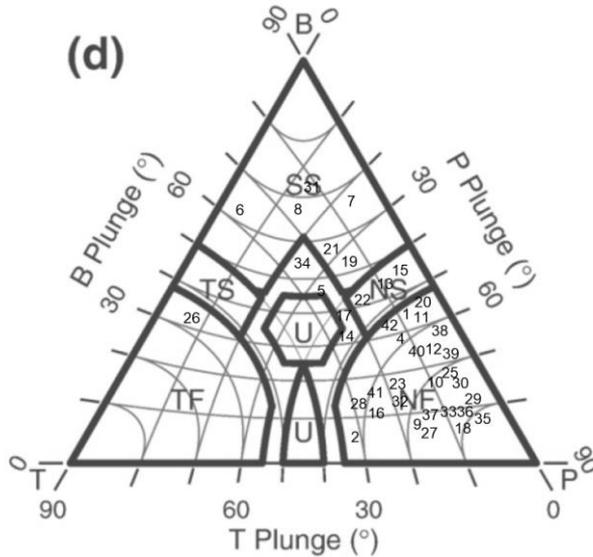


شكل 7: توزيع البؤر السطحية للأحداث الزلزالية المعتبرة صالحة لدراسة آلية البؤرة ضمن منطقة الدراسة وتشير الأرقام إلى قدر كل منها.



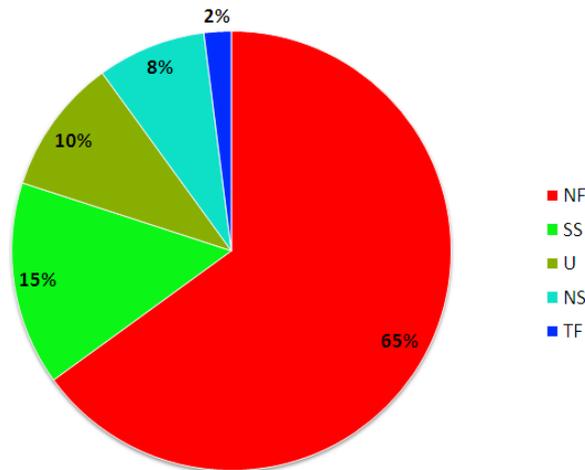
شكل 8: آليات البؤرة المحسوبة في منطقة الدراسة حيث تم تمثيل مستويات الحول الصدعية بمسقط متساوي المساحة للنصف السفلي من الكرة البؤرية: الربع الأبيض يمثل نطاق التمدد والأزرق يمثل نطاق الانضغاط.

استخدمنا في هذا البحث زوايا ميل محور الضغط (P) ومحور الحياضي (B) ومحور الشد (T) التي حصلنا عليها من آليات البؤرة باعتبار أنها مؤشرات على شعاع الانزلاق الصدعي لتصنيف الحركة الصدعية. وتم إسقاط هذه الزوايا على مثلث (Frohlich, 1992) كمخطط بيانياً ثلاثي الأذرع لتمثيل زوايا ميل المحاور الثلاثة بنقطة واحدة داخل المثلث البياني لإجراء معاينة بصرية للميل العام. طور (Zoback, 1992) هذا المثلث وقدم تصنيفاً أكثر تفصيلاً للحركة الصدعية يعتمد على ميل المحور الحياضي (B) واستخدمه في خارطة الإجهاد العالمية (World Stress Map). وسنعمد مثلث (Zoback, 1992) بهدف الحصول على تصنيف أدق للانزلاقات الصدعية المائلة (oblique slips) ويعرض الشكل (9) نتائج هذا التصنيف.



شكل 9. إسقاط زوايا ميل محور الضغط (P) ومحور الحياضي (B) ومحور الشد (T) على مثلث (Zoback, 1992) لآليات البؤرة المحسوبة والمشار إليه بالرمز (d) في الشكل 8.

يُظهر إسقاط زوايا ميل المحاور (P, B, T) لآليات البؤرة المحسوبة بهذا البحث على مثلث (Zoback, 1992) أن معظم الحركات الصدعية في منطقة الدراسة كانت من الصنف (NF) وتدل على تصدع عادي. وإحصائياً تدل النتائج على سيطرة الشد الناتجة عن تكتونيك تمديدي إذ كان التصدع عادياً نقياً (NF) في حوالي 65% من آليات البؤرة المحسوبة وكان تصدعاً عادياً مع وجود مركبة أصغرية للإزاحة الجانبية (NS) في 8% من الآليات المحسوبة (الشكل 10). وبالتالي فإن آلية التصدع العادي قد ظهرت في 73% من الهزات الأرضية المعالجة. بالمقابل كان هناك ست حركات صدعية فقط من الصنف (SS) وتدل على وجود تصدع الإزاحة الجانبية في حوالي 15%. وقعت بعض الحركات الصدعية في وسط المثلث ضمن التصنيف (U) أي الإزاحة المائلة الهجينة. لم تظهر إلا هزة واحدة فقط ضمن الصنف (TF) والذي يدل على حركة صدعية عكسية وقد وقعت بؤرة هذه الهزة في البحر مقابل لواء اسكندرون وبالتالي يمكن إهمال هذه الهزة.



شكل 8: النسب المئوية لأصناف آليات البؤرة المحسوبة في المنطقة الساحلية حسب تصنيف (Zoback, 1992).

8- المناقشة

يُمر في منطقة الدراسة نطاقين تكتونيين رئيسيين هما نظام صدع البحر الميت ونظام صدع الأناضول الشرقي. يتميز نظام صدع البحر الميت بحركة إزاحة جانبية يسارية والتي تم التعرف عليها من خلال الأحواض التمزقية الشدية الصغيرة في الرسوبيات الحديثة (Garfunkel et al. 1981, Trifonov 1991, Brew et al. 2001)، ومن خلال قطع وإزاحة المجاري المائية والمنشآت التي بناها الإنسان (Brew et al. 2001, Gomez et al. 2001, Gomez et al. 2003, Meghraoui et al. 2003, Gomez et al. 2006). لكن نتائج هذا البحث لم تُظهر تلك الإزاحة الجانبية اليسارية كآلية مسيطرة كما يتوقع الكثيرون بل كان لأغلب الأحداث المعالجة آلية التصدع العادي (NF) والتي شكلت ما نسبته (65%) من آليات البؤرة المحسوبة وهذا يدل على سيطرة التكتونيك الشدي في المنطقة الساحلية. يمكن تفسير هذه النتيجة بأن معظم الأحداث المسجلة خلال فترة الدراسة 1995-2011 كانت واقعة على الصدوع الجانبية لنظام صدع البحر الميت في سلسلة الجبال الساحلية وناتجة عن عمليات شد محلية. لقد وجد (Salamon et al. 2003) أن آليات التصدع العادي لبعض الأحداث قرب البحر الميت وخليج العقبة تسجل نشاط صدوع عادية تمتد على طول هوامش نظام صدع البحر الميت. كما أشارت بعض النتائج التي حصلنا عليها في هذا البحث إلى وجود مركبة إزاحية جانبية ترافق آلية التصدع العادي (NS) كما هو الحال في الحدتين الذين وقعا في حوض الغاب وكما هو الحال في الحدث الواقع في جنوب تل كلخ. يمكن أن تكون هذه

الأحداث مرتبطة بصدوع شد-انتقالي محلية. وظهرت بعض آليات البؤرة ذات الإزاحة اليسارية على الامتداد الشمالي لنظام صدع البحر الميت. أما في منطقة اسكندرون فكان لمعظم الأحداث الواقعة في تلك المنطقة آلية تصدع عادي مع غياب المركبة الإزاحية.

إن معظم الآليات التي أمكن حسابها قد أنتت من أحداث صغيرة القدر لذلك فإنها على الأرجح قد نتجت عن تحرك بعض الصدوع المحلية وبالتالي يمكن لها أن تمثل التغيرات المحلية بحقل الإجهاد. بالمقابل فإن غياب الأحداث الزلزالية كبيرة القدر يمكن أن يدفعنا للاعتقاد أن الصدوع الإقليمية الكبيرة تمر حالياً بفترة من الهدوء الزلزالي والذي بدأ منذ 850 سنة كما أشار (Meghraoui et al. 2003). يدعم هذا الاعتقاد عدم ظهور آليات الإزاحة الجانبية اليسارية المضرب والتي تميز الصدوع الإقليمية الكبيرة في منطقة الدراسة. لقد درس العبدالله (Al Abdalla et al., 2010) التطور التكتوني وتطور حقل الإجهادات القديم (palaeostress) في المنطقة الساحلية منذ أواخر الكريتاسي وحتى السينوزويك ووجد أن هذه المنطقة قد طورت تكتونيك شدي خلال الميزوزويك والباليوجين أما التشوهات الانضغاطية فلم تظهر إلا في نهاية الأوليغوسين في شمال منطقة البائر- البسيط حيث عانت هذه المنطقة من إجهادات الانضغاط بالاتجاه NNW-SSE منذ نهاية الميوسين حتى الآن. لكن النتائج التي حصلنا عليها في هذا البحث لم تُظهر وجود آليات التصدع العكسي في هذه المنطقة والتي يمكن أن ينتجها التكتونيك الضغطي. إذا تخالف نتائج هذا البحث والتي تُعبر عن حقل الإجهاد الحالي الدراسات الجيولوجية والتكتونية السابقة والتي سمحت بتقدير حقل الإجهاد القديم وبالتالي يمكن الاستنتاج بحدوث تغييرات حالية في حقل الإجهاد.

9- الخاتمة

تم في هذا البحث تحليل قاعدة التسجيلات الزلزالية للشبكة الوطنية للرصد الزلزالية في المنطقة الساحلية بهدف اختيار الأحداث الصالحة لحساب آلية البؤرة الزلزالية. ونتيجة لذلك تبين أن هناك 42 حدث زلزالي وقعت خلال الفترة 1995-2011 كان لها خمس قطبيات للموجة (P) على الأقل وهو الحد الأدنى لحساب آلية البؤرة الزلزالية. بينت مستويات الحلول الصدعية المحسوبة أن التكتونيك الشدي كان مسيطراً في معظم تلك الأحداث الزلزالية. وإحصائياً تدل النتائج على ظهور التصدع العادي النقي في حوالي 65% من آليات البؤرة المحسوبة وعلى ظهور التصدع العادي مع وجود مركبة أصغرية للإزاحة الجانبية في 8% من الآليات المحسوبة، وبالنتيجة فإن آلية التصدع العادي قد ظهرت في 73% من الهزات الأرضية المعالجة. بينما كانت آلية الإزاحة الجانبية أكثر ندرة ومحصورة في بعض المناطق. إن نتائج هذا البحث تخالف الدراسات الجيولوجية والتكتونية السابقة والتي تنبأت أن إجهاد التصدع العكسي يجب يكون مسيطراً. يمكن أن نقدم تفسيراً محتملاً لذلك أن آليات البؤرة المحسوبة في المنطقة الساحلية كانت لأحداث صغيرة القدر لذلك فإنها على الأرجح مرتبطة بالمظاهر المحلية للشد-انتقال على طول هوامش نظام صدع البحر الميت وبالتالي تعكس حقل الإجهاد المحلي. تبقى هذه النتائج أولية بالنظر لكون زمن العودة للزلازل الكبيرة ($M \geq 5$) طويل نسبياً في سورية وبالتالي فمن المرجح أن بعض الصدوع التي لم تُظهر نشاطاً زلزالياً خلال فترة هذه الدراسة قد تكون نشطة خلال فترة زمنية أطول.

كلمة شكر

يتوجه مؤلفو هذا البحث بالشكر الجزيل إلى المركز الوطني للرصد الزلزالي لتزويدهم بالتسجيلات الزلزالية وبعض المعلومات والمعطيات الهامة وبشكل خاص الجيوفيزيائي نظير اليوسف كما يتقدمون بالشكر للأستاذ الدكتور إبراهيم عثمان المدير العام لهيئة الطاقة الذرية لدعمه هذا البحث.

References

- Abdul-Wahed M. K. and M. Alissa, (2020), Present-day stress state in northwestern Syria, *Geofísica Internacional*, (2020) Vol. 59-4 -1; 300-316.
- 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., (2018b), Preparation of a computer program for calculating the focal mechanism of the recorded micro-earthquake in Syria, Internal Rapport, AECS.
- Abdul-Wahed M. K., 2012, The focal mechanism of recent largest seismic events in Syria. The 7th Gulf Seismic forum, Saudi Geological Survey; 22-25 January 2012, Jeddah, Saudi Arabia.
- 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.
- Aki K. & Richards P. G. (1980), *Quantitative Seismology, Theory and methode*. San Fransisco : W. H. Freeman and Co.
- Al-Abdalla, A. 2008. Evolution tectonique de la plateforme arabe en Syrie depuis le Me'sozoï'que. PhD thesis, Me'moire de the'se de l'Universite' de Paris 6, Paris, 302 (in French).
- Al abdalla A., Barrier E., Matar A. & Muller C., (2010), Late Cretaceous to Cenozoic tectonic evolution of the NW Arabian platform in NW

- Syria, Geological Society, London, Special Publications 2010; v. 341; p. 305-327, doi:10.1144/SP341.15.
- Ambraseys N. and Barazangi M., (1989), The 1759 earthquake in the Bekaa valley: implication for Earthquake Hazard Assessment in the Eastern Mediterranean Region. *Geophys. Res. J.*, Vol. 94, PP. 4007-4013.
- Anderson EM (1951) The dynamics of faulting. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- 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.
- Bräuer B., (2011), The structure of the southern Dead Sea basin revealed from local earthquake data, Dissertation, am Fachbereich Geowissenschaften, der Freien Universität Berlin, Potsdam, Mai 2011.
- Brew G., Barazangi M., Al-Maleh A. K., Sawaf T.(2001), Tectonic and geologic evolution of Syria, *GeoArabia*, Vol. 6, PP 573-616.
- Célérier, B., Etchecopar, A., Bergerat, F., Vergely, P., Arthaud, F. and Laurent, P., 2012. Inferring stress from faulting: From early concepts to inverse methods. *Tectonophysics*, 581: 206-219.
- 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.
- Devyatkin, E. V., Dodonov, A. E., Sharkov, E. V., Zykin, V. S., Simakova, A. N., Khatib, K. and H. Nseir, H., (1997). The El-Ghab Rift Depression in Syria: Its Structure, Stratigraphy, and History of Development. *Stratigraphy and Geological Correlation*, Vol. 5, No. 4, 1997, pp. 362–374.

- Frohlich C., 1992, Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75 (1992) 193-198.
- Frohlich, C and Apperson, K D, 1992 Earthquake focal mechanisms, moment tensors, and the consistency of seismic activity near plate boundaries *Tectonics*, 11 279-296.
- Garfunkel Z., Zak Y. & Freund R., (1981), Active faulting in the Dead Sea rift, *Tectonophysics*, Vol. 80, PP. 1-26.
- Gomez F., Meghraoui M., Darkal A. N., Sbeinati R., Darawcheh R., Tabet C., Khawlie M., Charabe M., Khair K. & Barazangi M., (2001), Coseismic displacements along the Serghaya fault : an active branch of the Dead Sea Fault System in Syria and Lebanon, *J. Geol. Soc. Lond.*, Vol 158, PP. 405-408.
- Gomez F., Meghraoui M., Darkal A. N., Hijazi F., Mouty M., Suleiman Y., Sbeinati R., Darawcheh R., Al-Gazzi R. & Barazangi M., (2003), Holocene faulting and earthquake recurrence along the Serghaya branch of the Dead Sea Fault System in Syria and Lebanon, *Geophysical J. Int.*, Vol 153, PP. 658-674.
- Gomez F., Khawlie M., Tabet C., Darkal A. N., Khair K. & Barazangi M., (2006), Late Cenozoic uplift along the northern Dead Sea transform in Lebanon and Syria, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 241, PP. 913-931.
- Hardebeck, J. L. and Shearer, P. M. (2003). Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93:2434-2444.
- Hardebeck, J. L. and Shearer, P. M. (2002). A new method for determining first motion focal mechanisms. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92:2264-2276.
- Hardebeck JL, Michael AJ (2006) Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *J Geophys Res* 111, B11310.
- Lay C. & Wallace T. C., (1995), *Modern global seismology*, San Diego ; Academic Press.
- McClusky, S.C., Balassanian, S., Barka, A., Ergintav, S., Georgie, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadaria, M., Ouzounis, A., Paradisissis, D., Peter, Y., Pirilepin,

- M., Reilinger, R.E., Sanli, I., Seeger, H., Teableb, A., Toksöz, N., Veis, V., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean Caucasus. *Journal of Geophysical Research* 105, 5695–5719.
- Meghraoui M., Gomez F., Sbeinati R., Van der Woerd J., Mouty M., Darkal A. N., Radwan Y., Layyous I., Al-Najjar H., Darawcheh R., Hijazi F. & Barazangi M., (2003), Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archaeo seismology and historical seismicity along the Dead Sea Fault System, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 210, PP. 35-52.
- Ponikarov, V.P. 1966. The Geology of Syria. Explanatory Notes on the Geological Map of Syria, Scale 1:200,000. Ministry of Industry, Damascus, Syrian Arab Republic.
- Reasenber, P. and Oppenheimer, D. (1985). Fpfit, fpplot, and fppage: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions. Technical report, U.S. Geol. Survey.
- Reilinger, R., et al. (2006), GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *J. Geophys. Res.*, 111, B05411, doi:10.1029/2005JB004051.
- Rukieh, M., Trifonov, V. G., Dodonov, A. E., Minini, H., Ammar, O., Ivanova, T. P., Taza, T., Yusef, A., Al-Shara, M., Jobaili, Y., 2005. Neotectonic map of Syria and some aspects of Late Cenozoic evolution of the northwestern boundary zone of the Arabian plate. *Journal of Geodynamics*, 40, 235-256.
- Salamon A., Hofstetter, A., Garfunkel Z., Ron H. (2003), Seismotectonics of the Sinai subplate – the eastern Mediterranean region, *Geophys. J. Int.*, Vol. 155, PP 149-173.
- Simpson RW (1997) Quantifying Anderson's fault types. *J Geophys Res* 102:17909–17919.
- Snoke, J. A., Munsey, J. W., Teague, A. G., and Bollinger, G. A. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. *Earthquake notes*, 55.
- Suetsugu, D. (1998). Practice on source mechanism, iisee lecture note. Technical report, Tsukuba, Japan.

- Trifonov et al., (2012), Neotectonics, recent geodynamics and seismic hazard of Syria. In: Transactions of the geological institute, vol 598. GEOS, Moscow, 204 pp
- Trifonov V. G. (1991), Levent fault zone in the northwest Syria, Geotectonics, Vol. 25, PP 145-154.
- Zoback, M.L., 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map project. J. Geophys. Res., 97, 11,703-11,728.