

استخدام تقنيات المعالجة الرقمية للإشارة الزلزالية في حساب تابع المحطة

نور كيكي خرسى⁽¹⁾ و نضال جوني⁽²⁾

تاريخ الإيداع 2014/09/02

قبل للنشر في 2014/12/24

الملخص

يمثل سطح انقطاع Moho السطح الفاصل الرئيس بين القشرة الأرضية والمعطف، إذ إنَّ هناك فرقاً كبيراً في سرعة انتشار الأمواج على جانبي هذا السطح فضلاً عن التغير في التركيب الكيميائي والخصائص الريولوجية، وتعدُّ معرفة عمق سطح Moho عاملاً مهماً في فهم البنية العامة للقشرة الأرضية المتعلقة بدوره بالتطور الجيولوجي والتكتوني للمنطقة (Zhu, Kanamori, 2000). ويسبب التباين الكبير في السرعة على جانبي سطح انقطاع ما، يتحول جزء من طاقة الأمواج P الواردة إلى هذا السطح من الأسفل إلى أمواج SV تسجل بواسطة المركبات الأفقية لمحطة التسجيل. من خلال قياس الفرق الزمني بين الموجة المباشرة P والموجة المتحوّلة SV يمكن تحديد سماكة القشرة أسفل المحطة.

إنَّ الأمواج P للزلازل البعيدة Teleseismic التي يبعد مركزها السطحي عن المحطة المسجلة مسافة تزيد على 30 درجة المسجلة بواسطة محطات ثلاثية المركبات (الشكل 2+3) تحمل معلومات عن بؤرة الهزة وبنية وسط الانتشار قرب كل من البؤرة والمحطة، فضلاً عن تأثيرات الانتشار ضمن المعطف (Cassidy, 1992). ومن أجل عزل استجابة الجزء العلوي من الليتوسفير للأمواج الواردة عن الأطوار الموجية الأخرى التي يتضمنها القطر الموجي للزلازل البعيدة، تُطبَّق عادة الإجراءية المقترحة من قبل Langston (1979) إذ تعتمد هذه الإجراءية على فك التني (Deconvolution) للمركبة العمودية للسجل الزلزالي للهزة البعيدة من المركبات الأفقية للحركة.

الكلمات المفتاحية: سطح الانقطاع، فك التني، الهزات البعيدة، حساب تابع المحطة.

⁽¹⁾ طالبة ماجستير، ⁽²⁾ أستاذ، قسم الجيولوجيا، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

Using Digital Seismic Signal Processing Techniques in Receiver Function Computation

N. Kiki Khersy⁽¹⁾ and N. Johnny⁽²⁾

Received 02/09/2014

Accepted 24/12/2014

ABSTRACT

The Mohorovicic discontinuity (Moho), which separates the Earth's crust from the underlying mantle, represents a major change in seismic velocities, chemical compositions and rheology. The depth of the Moho is an important parameter to characterize the overall structure of the crust and can often be related to geology and tectonic evaluation of the region

(Zhu and Kanamori, 2000). Owing to the large velocity contrast across the discontinuity, part of the incoming teleseismic *P* wave energy will convert into *SV*- wave at the Moho. By measuring the time separation between the direct *P* arrival and the conversion phase, the crustal thickness can then be estimated.

Receiver function analysis model the *P* to *S* converted teleseismic phases and reverberations (multiples) associated with seismic discontinuities beneath the recording site. Modeling the amplitude and timing of these phases can supply valuable information about the lithosphere structure. Teleseismic *P*-waveforms recorded at three-component seismic stations contain information on the earthquake source, the Earth structure in the vicinity of both the source and the receiver, and mantle propagation effects.

In order to isolate the response of the lithosphere structure to the incoming teleseismic *P*-waves from the rest of the information contained in the teleseismic registration, a source equalization procedure is applied. This procedure consists of a simple deconvolution of the vertical component from the radial component of motion.

Key words: Discontinuity surface, Deconvolution, Teleseismic waves, Receiver function.

⁽¹⁾ MCS., Student, ⁽²⁾Prof., Department of Geology, Faculty of Science, Damascus University, Syria.

المقدمة

يتمثل الهدف الرئيس لطرائق المعالجة كلها في الحصول على الأشكال الموجية المفيدة التي تحمل معلومات عن المنبع الزلزالي وتأثير المسار والطبقات الجيولوجية بعد التخلص من الضجيج، وكذلك معاملات هذه الأمواج من أزمنة الوصول والسعة والتردد، إلا أن المشكلة الأساسية التي تواجه تحقيق هذا الهدف تتمثل في تداخل أمواج التشويش مع الأمواج المفيدة، لذلك فإن تخلص الأمواج المفيدة من التشويش تعدّ من المهام الرئيسة لعملية المعالجة (Processing).

يعدّ فكّ الثني من طرائق المعالجة الرقمية الفعالة في فصل المركبات المختلفة عن الأثر السيزمي (سجلات المسح السيزمي - سجل زلزالي ...) وعزل تأثيرات المنبع الاهتزازي أو المسار أو التأثيرات المختلفة للموقع، ويستخدم على نطاق واسع في حساب تابع المحطة (Receiver Function). يُحسب تابع المحطة بالاعتماد على السجلات الزلزالية من خلال عزل تأثيرات الخصائص الجيولوجية للمسار (وسط الانتشار) عن التأثيرات الخاصة بالمصدر الزلزالي، مما يسمح بدراسة البنية والتركيب الجيولوجي أسفل محطة التسجيل.

لذا يعدّ فكّ الثني العملية الأساسية في حساب تابع المحطة، وغالباً يكون ناتج فكّ الثني غير مستقر رقمياً ولاسيماً عندما تكون نسبة الإشارة المفيدة إلى الضجيج منخفضة، وذلك لأنّ التسجيلات حاوية على الضجيج (Di, Bona, 1998). عندما يُفكّ الثني في مجال التردد تكون النتيجة غير مستقرة بسبب القيم الصغيرة للترددات في مقام النسبة بين طيفي السعة (Spectral holes)، مما يحول دون إمكانية حساب هذه النسبة بنجاح من خلال قسمة طيف السعة للمركبات الأفقية على طيف السعة للمركبة العمودية.

اقترحت تقنيات عدّة للتقليل من تأثير القيم بالغة الصغر للترددات في مقام النسبة السابقة (Di, Bona, 1998). اعتمد Langston (1979) على طريقة مستوى الماء Water level عند تطبيق فكّ الثني، ثم قام بتصفية الترددات المرتفعة من خلال مصفي غاوسي على توابع المحطة، و ذلك بهدف إزالة الاستجابة للبنيات الثانوية. كما طوّرت تقنية المسألة العكسية في مجال الزمن من قبل Ammon عام 1999 الذي أطلق عليها: الحساب التكراري لفكّ الثني في المجال الزمني "Iterative Time Domain Deconvolution".

إذاً لفكّ الثني المستخدم في تحديد تابع المحطة تقنيات مختلفة، لكن الأكثر شهرة وهي التي اعتمدت ضمن البحث:

- Spectral Domain De-convolution with Water Level
- Iterative Time Domain Receiver function calculation

التعريف بالطريقة

تقنية تابع المحطة (Receiver Function Technique)

تهدف تقنية تابع المحطة إلى دراسة البنية أسفل محطة التسجيل من خلال عزل استجابة الجزء العلوي من الليتوسفير للأمواج الواردة عن الأطوار الموجية الأخرى التي يتضمنها القطار الموجي للهزات البعيدة، تُطبَّق عادةً الإجراءية المقترحة من قبل Langston (1979)، إذ تعتمد هذه الإجراءية على فك التثني (Deconvolution) للمركبة العمودية للسجل الزلزالي للهزة البعيدة من المركبات الأفقية للحركة.

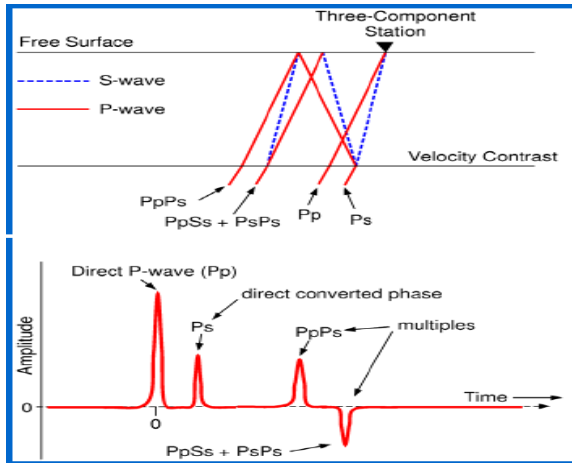
خلال عملية فك التثني سابقة الذكر تُحذف الأطوار الزلزالية التي تمثل المصدر الزلزالي الناتجة عن استمرار صدور الطاقة الاهتزازية عن بؤرة الهزة الأرضية، فضلاً عن عزل استجابة جهاز التسجيل (المحطة) لتبقى التسجيلات التي تمثل استجابة البنيات أسفل محطة التسجيل للأمواج الواردة.

وتعدُّ تقانة تابع المحطة (Receiver function) طريقة فاعلة وحديثة العهد نسبياً في الحصول على معلومات عن سطوح الانقطاع في القشرة، والمعطف العلوي أسفل محطات الرصد الزلزالي ثلاثية المركبة. حيث تجري نمذجة ساعات وأزمنة وصول أمواج P المتحولة إلى S (Ps) عند سطوح انقطاع رئيسة تحت محطة التسجيل، وذلك من أجل الزلازل البعيدة، فمن خلال هذه النمذجة لساعات هذه الأمواج وتأخيرها الزمني مقارنة بزمن وصول الموجة المباشرة P يمكن الحصول على معلومات مهمة عن أعماق هذه البنيات وسرع انتشار الأمواج الزلزالية عندها. ويُعدُّ تحديد الطور Ps المرحلة الأولى التي تمكنا من الانتقال بعدها للمرحلة الثانية في تابع المحطة، وهي كيفية استنتاج الأعماق وبصورة أساسية عمق الانقطاع Moho من أزمنة الوصول إلى الأطوار المتحولة Ps.

يبين الشكل (1) مفهوم تقنية تابع المحطة بعد إجراء فك التثني، إذ تدل النبضات ذات القطبية الموجبة في تابع المحطة على ازدياد في قيمة السرعة باتجاه الأسفل، في حين تمثل الساعات السالبة طبقات ذات سرعات منخفضة مقارنة بالطبقات التي تعلوها.

إذ حُسبت من خلال تقنية تابع المحطة سلاسل زمنية (Time Series) الشكل (5,6,7,8) من السجلات الزلزالية لمحطات رصد زلزالي ثلاثية المركبات لهزات بعيدة الشكل (2,3). و الموجة المدروسة عبارة عن موجة طولية P متحولة إلى موجة عرضية S على سطوح انقطاع بارزة (سطح الموهو) يرمز لهذه الأمواج (Ps).

ومن ثمَّ فإنه قبل عملية المعالجة الرقمية لا يمكن ملاحظة الطور Ps من الإشارات الزلزالية ثلاثية المركبات، وإنما بعد تطبيق هذه المعالجة المتمثلة بصورة أساسية بعملية فك التثني، لوحظ هذا الطور من خلال عزله عن الأطوار الموجية الأخرى.



الشكل (1) شكل تخطيطي يوضح مفهوم تابع المحطة بعد عملية فك الثني.

الطور P_p يمثل الموجة المباشرة التي تصل إلى محطة التسجيل على شكل موجة طولية، الطور P_s يمثل الموجة P المتحوّلة إلى S عند سطح الانقطاع أسفل محطة التسجيل، أما الأطوار $P_p P_s$ ، $P_p S_s$ و $P_s P_s$ فتتمثل الانعكاسات المتكررة بين سطح الانقطاع والوجه الداخلي لسطح الأرض الواصلة إلى محطة التسجيل على شكل أمواج S (Ammon، 1991).

الهدف من البحث

تطوير خوارزمية لحساب فك الثني باستخدام برامج حاسوبية، تخصصية، تعنى بمعالجة المعطيات الزلزالية و معالجة الإشارة وتمييز الأطوار الموجية المختلفة مثل برنامج (THE EARTHQUAKE ANALYSIS SOFTWARE) SEISAN، فضلاً عن برنامج الـ MATLAB من خلال إجراء العمليات الرياضية المتضمنة تحويلات فورييه وفورييه العكسية والتصفية العكسية للإشارة.

ثم العمل على تطبيق هذه الخوارزميات في مجال الزمن والتردد Time Domain & Frequency Domain لسجلات زلزالية بعيدة "Teleseismic events" المسجلة بمحطات الرصد الزلزالي الرقمية ثلاثية المركبات التابعة للمركز الوطني للزلازل ذات الدور القصير Short Period، وسجلات الحزمة العريضة Broad Band.

من أجل الوصول إلى هدف البحث أُجري ما يأتي:

- 1- إجراء عملية فك الثني في مجال التردد من خلال حساب النسبة الطيفية (Spectral Division) بالاعتماد على طريقة مستوى سطح الماء (Water level).
- 2- إجراء عملية فك الثني في مجال الزمن، ومقارنة النتائج لكانتا الحالتين من خلال التطبيق على سجلات زلزالية لهزات بعيدة Teleseismic.

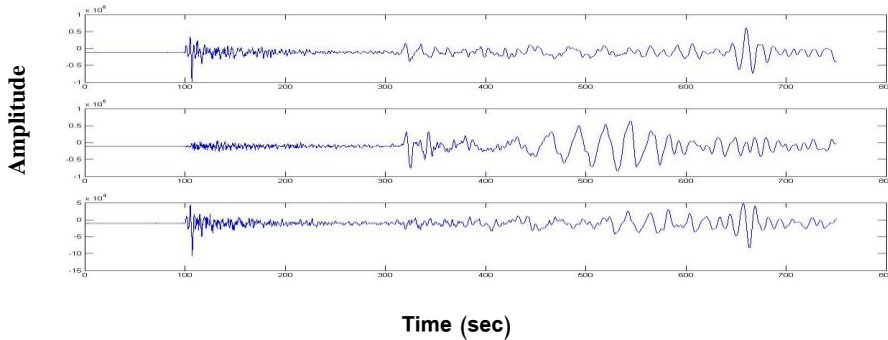
3- حساب عمق الموهو Moho (سماكة القشرة) أسفل المحطة المختارة بعد تحديد الطور Ps.

لمحة عن أجهزة الرصد الزلزالية

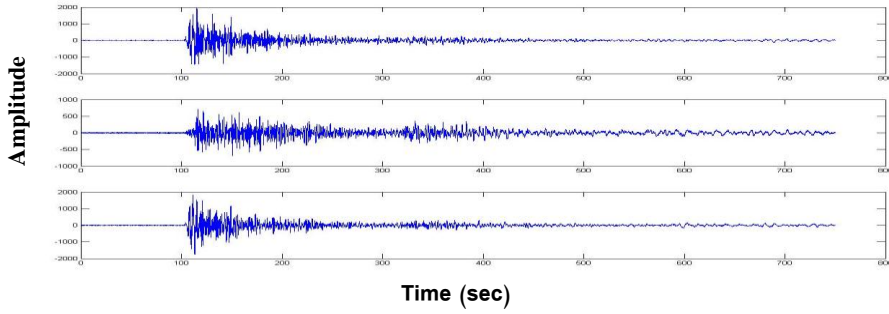
1 - لواقط قصيرة الدور Short-Period (Sh-P) وهي مخصصة للزلازل المحلية القريبة ذات الدور القصير التي لها مدة زمنية قصيرة جداً، وتردد الطنين عالٍ مقارنة بمعظم ترددات الأمواج الزلزالية، أي إنها تستخدم للتسجيلات التي تهيمن عليها الترددات العالية، والإزاحة في مقياس (Sh-P) تتناسب مع التسارع الأرضي لذلك يطلق عليه Accelerometer وصُمم من أجل استجابة الترددات من 1 هرتز - 10 هرتز وبدور في حدود 1 ثانية إلى 0.1 ثانية كما في الشكل (2).

2- لواقط طويلة الدور Long-Period مخصصة للزلازل البعيدة Teleseismic، يكون تردد الطنين في هذه الأجهزة منخفضاً جداً، والتأخير بين السيسموميتر (الجهاز اللاقط) والحركة الأرضية يصبح مساوياً للصفر، وسعة إزاحة اللاقط مساوية لإزاحة الأرض ويسمى أحياناً بجهاز Displacement meter. صُمم لتسجيل الإشارات الزلزالية التي ترددها Frequency ضمن 0.01 - 0.1 هرتز والدور Period من 10 - 100 ثانية.

3- لواقط الحزمة العرضية Broad-Band، وهذه اللواقط مفتوحة للأدوار الزمنية كلها حتى الأكبر من دقيقة (0.05 - 50) Hz. ولهذه الأجهزة حساسية عالية لنطاق واسع من المجال الديناميكي، فهي تستخدم لتسجيل مجموعة واسعة من الترددات، بدءاً من الضجيج إلى الزلازل الضخمة (الكبيرة)، والأدوار التي يمكن تسجيلها من الأجسام الموجية عالية التردد إلى الذبذبات طويلة الدور المرتبطة بمد الأرض وجذرها، (الشكل 3).



الشكل (2) مثال لزلزال مسجل بمحطة البيضا وبواسطة لواقط الحزمة العريضة (Broad Band)



الشكل (3) مثال لزلزال مسجل بمحطة حاويك ويلاقط قصير الدور (Short Period)

البيانات والنتائج

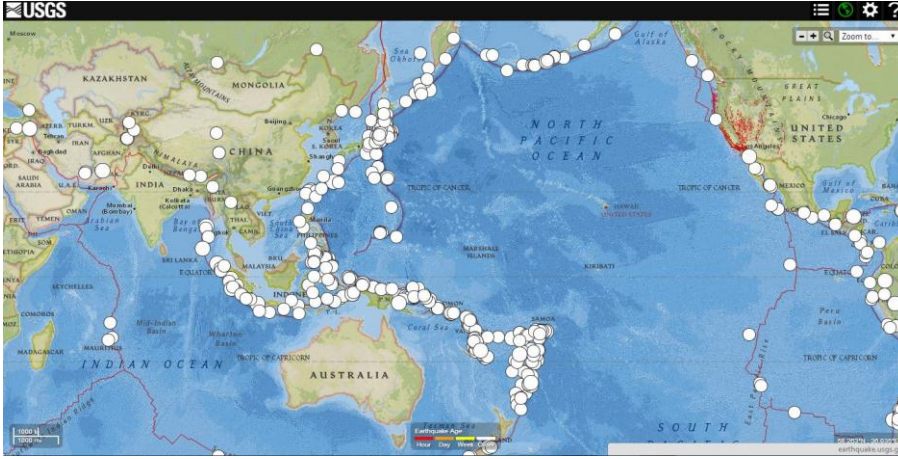
1- المعطيات المستخدمة:

اختُبرت الخوارزميات من خلال تطبيقها على سجلات زلزالية حقيقية مسجلة بمحطات الشبكة الوطنية للمركز الوطني للزلازل. وحُسب تابع الحطة من أجل المحطتين الزلزليتين حاويك والبيضا، وتمتاز هاتان المحطتان بجودة تسجيلاتها مقارنة بالمحطات الأخرى في الشبكة الوطنية، ومن ثم جودة توابع المحطة المحسوبة من أجل الهزات البعيدة المختلفة المسجلة بواسطتها، وذلك خلال العامين 2009 و2010.

وتعدُّ محطة حاويك HAWK (الشكل 2) حاوية على تسجيلات زلزالية مسجلة بحساسات قصيرة الدور Short -Period، أمّا محطة البيضا BIDA (الشكل 3) فتتضمن تسجيلات مسجلة بمحطات واسعة الاستجابة الطيفية Broad-Band، كما يبيّن الجدول (أ) إحدائيات كل من محطتين حاويك والبيضا.

حُسبت توابع المحطة على المركبتين الأفقيتين (شمال- جنوب) و(شرق- غرب) بأخذ نوافذ زمنية بطول 40 ثانية من الوصول الأولي للموجة P المباشرة.

يظهر الشكل (4) التوزيع السطحي للهزات البعيدة المستخدمة في هذه الدراسة. وذلك خلال العامين 2009 و2010 من أجل تسجيلات محطة البيضا واسعة الاستجابة الطيفية والأعوام من 2009-2010-2011-2012 من أجل تسجيلات محطة حاويك قصيرة الدور التي يزيد قدر هذه الهزات على 7 ريختر.



الشكل (4) التوزيع السطحي للزلازل البعيدة

الجدول (أ) إحداثيات محطة حاويك و بيضا

| No | Name | Latitude(N) | Longitude(E) | Hight(m) |
|----|------|-------------|--------------|----------|
| 1 | HAWK | 34.5211 | 36.4055 | 1000 |
| 2 | BIDA | 35.0456 | 36.3152 | 890 |

2- البرامج المستخدمة:

(THE EARTHQUAKE ANALYSIS SOFTWARE): SEISAN

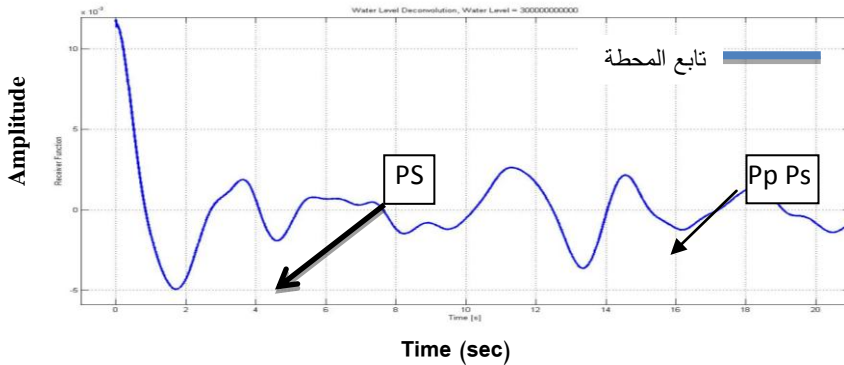
بداية إستخدام برنامج الـ SEISAN المستخدم من أجل معالجة المعطيات الزلزالية، ومعالجة الإشارة، وتمييز الأطوار الموجية، وحساب معاملات الزلازل (الموقع-القدر)، ورسم الخرائط الزلزالية، فضلاً عن أغراض أخرى.

وتم الحصول على قائمة الإحداثيات لمواقع توزع المراكز السطحية للزلازل من النشرات الزلزالية الصادرة عن المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS نظراً إلى دقتها، الذي شمل نحو 100 حدث، وموقع EMSC (الشبكة الأوروبية المتوسطة للزلازل) وبأبعاد تراوح بين 30-90 درجة، ومن ثم العودة إلى برنامج SEISAN لانقضاء الزلازل وتحديد أزمنا الوصول الأولية للتأكد من الموقع الجغرافي للحدث، وإيجاد مجموعة من البارامترات اللازمة لإتمام العمل، وأدرج الجدول (ب) الذي يوضح بعض الزلازل المستخدمة في الدراسة.

كما إستخدم هذا البرنامج من أجل تحويل صيغ الأحداث Format من أجل التمكن من استخدامها في برامج المعالجة الأخرى مثل الماتلاب Matlab إذ جرى التحويل من الصيغة المسجلة ببرنامج الـ SEISAN إلى صيغة الـ ASCII من خلال البرنامج الفرعي الموجود ضمن البرنامج الرئيس (التعليمة) SEISAF.

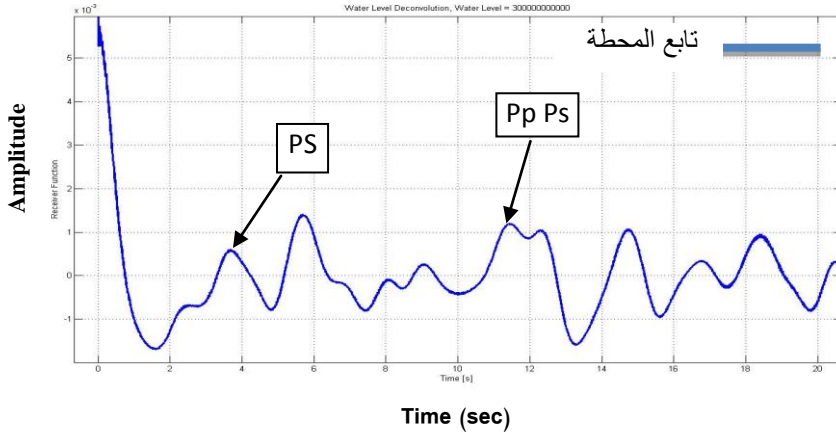
MATLAB

اعتمد على برنامج الماتلاب اعتماداً أساسياً في هذا البحث، من خلال إجراء العمليات الرياضية المختلفة و تحويلات فورييه وفورييه العكسية والتصفية العكسية للإشارة، فضلاً عن وضع الكودات (الخوارزميات) التي استخدمت في البحث في تحويل مفهوم الثني وفك الثني والارتباط المتصالب إلى تعليمات باستخدام الماتلاب، ورسم الإشارات والتعديل عليها، وتطبيق مختلف وسائل المعالجة الرقمية بسهولة من خلاله وصولاً إلى تحديد الطور PS ومن ثم تحقيق هدف البحث. ويظهر كل من الشكل (5) المركبة شمال-جنوب لتابع المحطة لزلازل بعيد مسجل بتاريخ 6-6-2009 بعد إجراء عمليات المعالجة للإشارات الزلزالية المبينة في الأشكال (2) و(3)، وتطبيق عملية فك الثني من خلال برنامج الماتلاب، ولوحظ ظهور الطور Ps بشكل واضح نوعاً ما عند الزمن 4-3.8 تقريباً، فضلاً عن الطور $P_p P_s$ والمتمثل بالانعكاسات المتكررة بين سطح الانقطاع والوجه الداخلي لسطح الأرض الواصلة إلى محطة التسجيل على شكل أمواج s الذي يلاحظ بوضوح أيضاً عند الزمن 11.4 ثانية. كما تم إيجاد المركبة شمال-جنوب لتابع المحطة للزلازل نفسه والمبين في الشكل (6)، ونلاحظ هنا أيضاً ظهوراً واضحاً للطور Ps تقريباً عند الزمن السابق نفسه 4-3.8 ثانية. كما ساعدت عملية الجمع (Stacking) لتتابع المحطة على تعزيز نسبة الإشارة المفيدة إلى الضجيج. يظهر الشكلان (7) و(8) ناتج عملية التكديس لتتابع المحطة من أجل زلازل مسجلة بمحطات Broad-Band و Short-Period على الترتيب. يبين الشكلان (2) و(3) الإشارات الزلزالية قبل إجراء عمليات المعالجة الرقمية، في حين تعبر الأشكال (5-6-7-8) عن الإشارات التي تم التوصل إليها (تابع المحطة) بعد المعالجة الرقمية لهذه الإشارات التي تمثلت بشكل أساسي من خلال فك الثني وتحويلات فورييه والارتباط المتصالب.

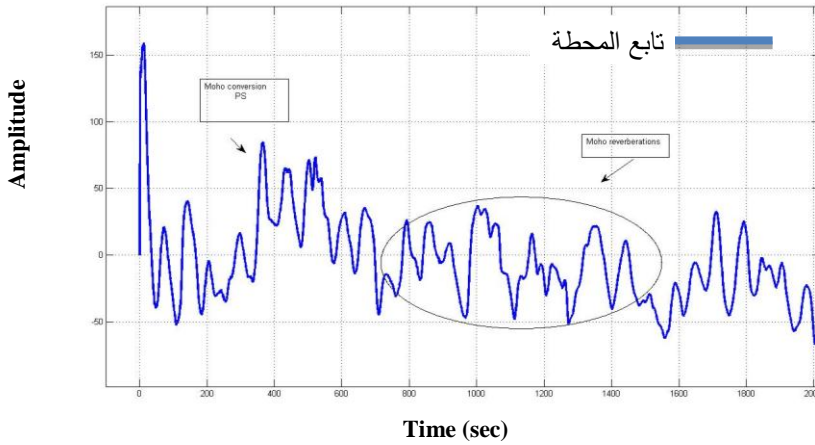


الشكل (5) المركبة شمال - جنوب لتابع المحطة لزلازل مسجل بتاريخ 06-06-2009 -
20:44 بمحطة Broad - Band.

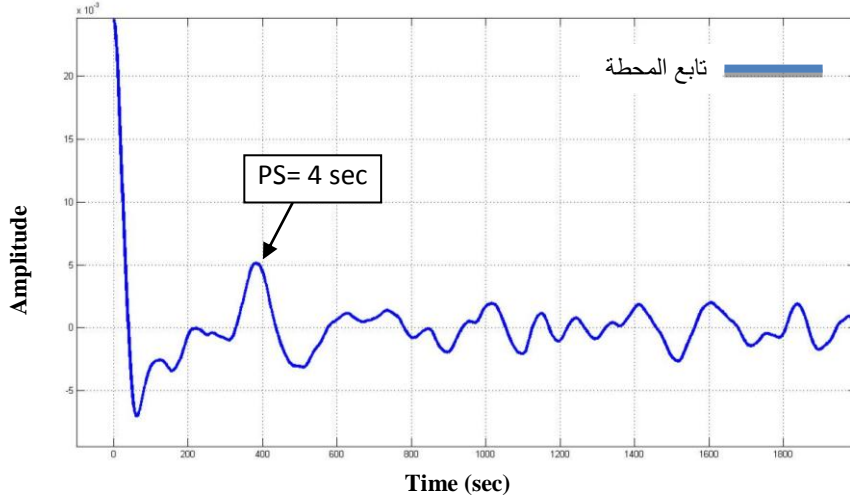
نلاحظ من الشكل أن زمن وصول الطور Ps هو 4 - 3.8 ثانية.



الشكل (6) المركبة شرق - غرب لتابع المحطة لزلزال مسجل بتاريخ 20:44 -06-06-2009 بمحطة Broad-Band ونلاحظ من الشكل أن زمن وصول الطور Ps هو 3.8-4 ثانية.



الشكل (7) ناتج عملية (الجمع) التكديس من أجل زلازل مسجلة بمحطة Broad - Band



الشكل (8) ناتج عملية التكديس من أجل زلازل مسجلة بمحطة Short - Period

التقنيات المتبعة في حساب تابع المحطة

- فك الثني في مجال التردد "التقسيم الطيفي" مع مستوى الماء:
- Spectral Domain Deconvolution with Water Level

يمكن توصيف فك الثني (Deconvolution) من خلال العلاقة:

$$H(\omega) = \frac{S(\omega)R(\omega)}{S(\omega)Z(\omega)} = \frac{R(\omega)}{Z(\omega)} \quad (1)$$

إذ تعبر $S(\omega)$ عن طيف السعة لتابع السرعة، في حين تعبر $H(\omega)$ عن تحويل فورييه لتابع المحطة $h(t)$ ، $R(\omega)$ تمثل المركبة الأفقية للسجل الزلزالي، و $Z(\omega)$ تمثل المركبة العمودية. خلال عملية فك الثني سابقة الذكر تُحذف الوصلات الثانوية للأمواج P والناتجة عن استمرار صدور الطاقة الاهتزازية عن بؤرة الهزة الأرضية فضلاً عن استجابة جهاز التسجيل (المحطة) لتبقى التسجيلات التي تمثل استجابة البنيات أسفل محطة التسجيل للأمواج الواردة.

ليكن لدينا إشارة أصلية في مجال التردد لحدث بعيد، $T(\omega)$ التغيرات التي تطرأ على الإشارة خلال مسارها، واستجابة جهاز التسجيل $I(\omega)$ ، واستجابة المصدر الزلزالي $E(\omega)$ ، الاستجابة للتغيرات السريعة بالقرب من المستقبل تكون $H(\omega)$ الإشارة المسجلة على المركبة العمودية:

$$Z(\omega) = E(\omega)T(\omega)I(\omega)$$

والمركبة الأفقية لتابع المحطة نسبة إلى موقع الأحداث هي:

$$R(\omega) = E(\omega)T(\omega)I(\omega)H(\omega)$$

تسجل هذه التغيرات جميعها على مركبات السيسموغرام، إلا أن المركبة الأفقية تستجيب للتغيرات التي تطرأ على الإشارة بالقرب من المستقبل، لذلك يُسجل الطور Ps على المركبة الأفقية المتمثل بالمكون $H(\omega)$ ، ولعزل هذه الاستجابة بالقرب من المستقبل وهو عبارة عن التابع الذي يمثل تغيراً في السرعة، نلجأ إلى تقنية فك التثني من خلال تقسيم المركبة الأفقية للسيسموغرام (السجل الزلزالي) على المركبة العمودية:

$$H(\omega) = R(\omega) / Z(\omega)$$

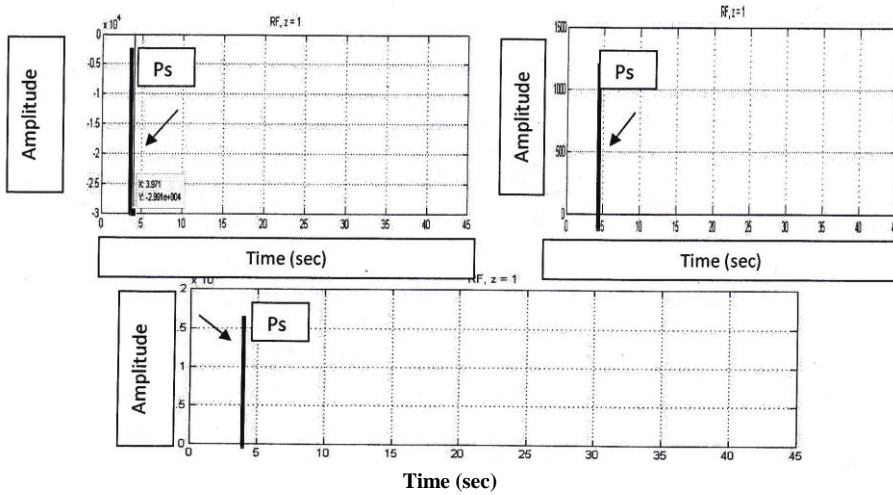
يوافق القسمة في مجال التردد فك التثني في مجال الزمن، ويمكن حساب فك التثني سواء في المجال الزمني أو في مجال التردد، وإن تحويل فورييه العكسي للتابع $H(\omega)$ هو $h(t)$ وهو تابع المحطة الذي يشير إلى التباين في سرعة مسار الأشعة السيزمية الواردة.

يُعدُّ حساب $H(\omega)$ في مجال التردد -في الواقع- مشكلة بسبب فك التثني والقيم البالغة الصغر، ومن ثمَّ فإنَّ المشكلة لحساب تابع المحطة هو مشكلة فك التثني Deconvolution.

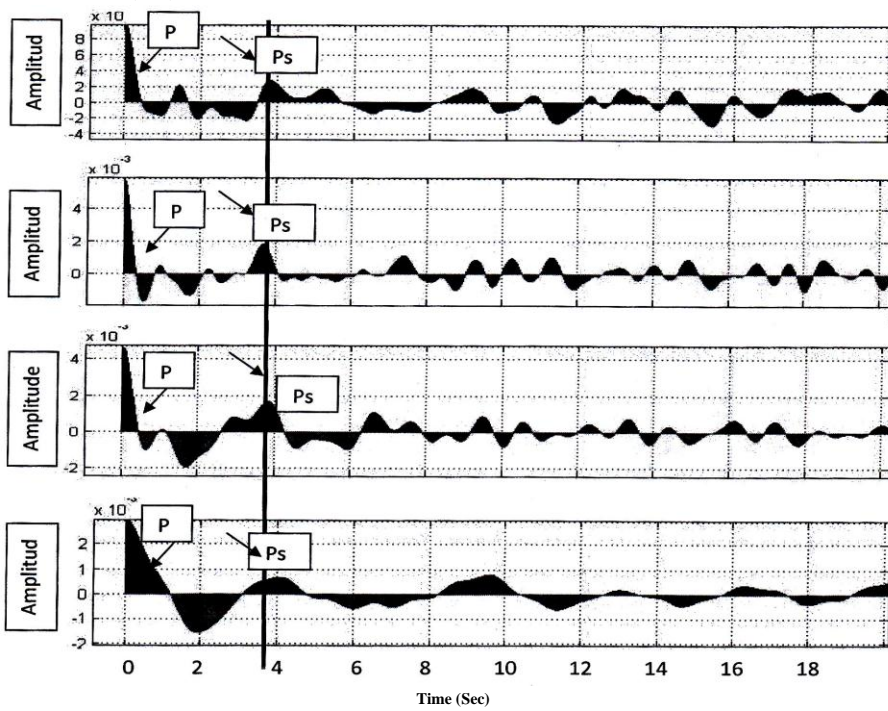
تجري هذه التقنية في حساب تابع المحطة من خلال الحل المباشر للمعادلة (1)، ومن أجل هذا الهدف، ينبغي تحويل كل من المركبة العمودية والأفقية للسيسموغرام (السجل) من المجال الزمن إلى المجال الترددي؛ وذلك باستخدام تحويلات فورييه. ونتيجة القسمة تعطي تابع المحطة.

وغالباً يكون ناتج فك التثني غير مستقر رقمياً، وذلك لأنَّ التسجيلات حاوية على الضجيج (Di Bona, 1998). وعندما يُفكُّ التثني في مجال التردد تكون النتيجة غير مستقرة بسبب القيم الصغيرة للترددات في مقام النسبة بين طيفي السعة (Spectral holes) لمركبات السيسموغرام، هذا يحول دون إمكانية حساب هذه النسبة بنجاح من خلال قسمة طيف السعة للمركبات الأفقية على طيف السعة للمركبة العمودية. لذا اقتُرحت تقنيات عدَّة للتقليل من تأثير القيم بالغة الصغر للترددات في مقام النسبة السابقة إذ اعتمد Langston, 1979 على طريقة مستوى الماء (Water Level) عند تطبيق فك التثني. ثم قام بتصفية الترددات المرتفعة من خلال تطبيق مصفي غاوسي على توابع المحطة، وذلك بهدف إزالة الاستجابة للبنى الثانوية.

فمن أجل التخلص من تأثير القيم بالغة الصغر لمقام النسبة الطيفية التي تمثل المركبة Z قمنا بإيجاد طيف الطاقة (ESD) لهذه المركبة من أجل إزالة الترددات العالية والإبقاء على الترددات المنخفضة فقط من خلال تحديد قيمة ثابتة لمستوى سطح الماء، والحصول من خلال هذه الإجراءات على ترددات متساوية عند هذا المستوى والاستقرار في عملية فك التثني، ومن ثمَّ يمكن عدُّ هذا المستوى بمنزلة مصفي (فلتر) يمرر الترددات المنخفضة فقط Low Pass Filter. ويظهر الشكل (a-11) المخطط التدفقي (الخوارزمية) لمراحل عمل طريقة فك التثني بتقنية مستوى الماء.



الشكل (9) تحديد الطور $4=PS$ ثانية بتطبيق تقنية الحساب التكراري لفك الشبي في مجال الزمن.



الشكل (10) تحديد الطور $3.8=PS$ ثانية بتطبيق تقنية مستوى سطح الماء في المجال الترددي

تقنية الحساب التكراري لفك الثني في المجال الزمني لإيجاد تابع المحطة:

Iterative Time Domain Receiver function calculation

تعتمد هذه التقنية في تطبيقها على تابع الارتباط المتصالب وقد طُوِّرت ن قبل:

Kikuchi and Kanamori (1982) and Ligorria and Ammon (1999)

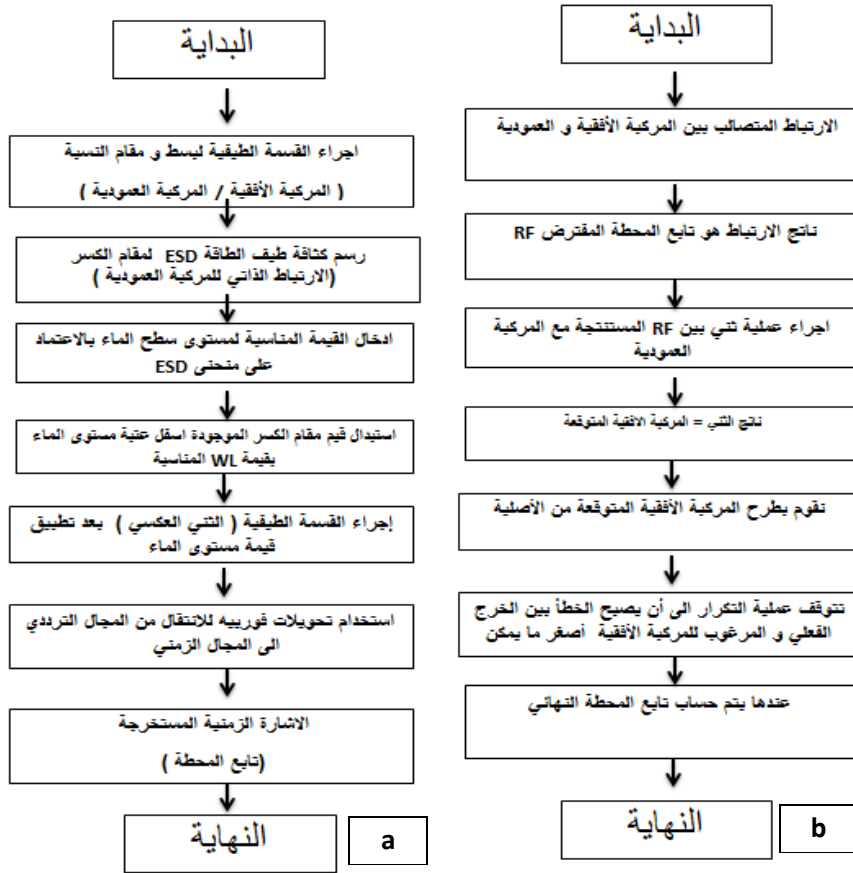
تقوم طريقة فك الثني التكراري في مجال الزمن بحسب (Ligorria, Ammon, 1999) على أساس أن تابع المحطة يتألف من تراكب مجموعة من النبضات المتتالية التي تعدُّ هذه النبضات لانتهائية في مجال التردد، وفي معظم الحالات تمثل نبضة غاوسي التي تُحسب عن طريق الارتباط المتصالب بين المركبة العمودية والمركبة الأفقية، لإيجاد زمن الذروة (النبضة) الأولى لتابع الارتباط، ثم تُجرى بعد ذلك عملية ثني بين نتيجة الارتباط التي تمثل قيمة تابع المحطة المقدره مع المركبة العمودية Z للسيسموغرام (السجل) لأن نتيجة هذا الثني تمثل المركبة الأفقية المتوقعة والمطروحة من المركبة الأفقية الأصلية (الملاحظة) للسجل الزلزالي ويُجرى مرة أخرى ارتباط متصالب بين النتيجة السابقة مع المركبة العمودية Z وتتكرر هذه العملية عدة مرات بحسب الـ Pikes النبضات المطلوبة في تابع المحطة.

تكرر هذه العملية إلى أن يصبح الخطأ بين الخرج الفعلي و الخرج المرغوب فيه أصغر ما يمكن بمفهوم Least Squares، (Ligorria and Ammon 1999)، وتتوقف عملية التكرار عندما يتم التوصل إلى الحل الأمثل لإيجاد تابع المحطة.

تشير النبضات في تابع المحطة (الطور Ps والأطوار المنعكسة) إلى انقطاع سرعي (تغير في السرعة) لمسار الأشعة الواردة ويرتبط موقع هذه النبضات بالمسافة بين سطح الانقطاع والمستقبل، كما يظهر الشكل (11-b) مخطط العمل (الخوارزمية) بطريقة فك الثني التكراري في مجال الزمن، ويبين الشكل (9) زمن الطور Ps لعدد من الزلازل المستخدمة بطريقة الحساب التكراري لفك الثني في المجال الزمني، في حين يظهر الشكل (10) زمن الطور Ps للزلازل المستخدمة بطريقة فك الثني في مجال التردد "التقسيم الطيفي" مع مستوى الماء، وهنا نلاحظ التطابق في قيمة الزمن بكلتا الطريقتين.

التطبيق العملي لتابع المحطة

تعدُّ المهمة الأساسية لهذه الدراسة هي إيجاد عمق الموهو Moho (سماكة القشرة) أسفل المحطة المختارة من خلال تطبيق الخوارزميات المتمثلة بفك الثني والارتباط المتصالب وغيرها من العمليات المستخدمة في الدراسة على تسجيلات محطات الشبكة الوطنية المدروسة وتحديد زمن وصول الطور PS، وحساب سرعة الموجة المباشرة P والموجة S.



الشكل (11) مخطط تدفقي لكل من تقنية الحساب التكراري لفك التنبؤ وتقنية مستوى سطح الماء ويعتمد الفرق الزمني بين وصول الموجة المباشرة P والأمواج المتحولة Ps على السرعة Vp و Vs ضمن طبقة ما، وعمق هذه الطبقة :

$$H = tps / (1/Vs^2 - Pr^2)^{1/2} - (1/Vp^2 - Pr^2)^{1/2}$$

إذ Pr هو بارامتر الشعاع (Ray Parameter)، وغالباً يكون ضمن المجال -0.005 إلى 0.007 في أغلب الدراسات السابقة، واعتمدت القيمة $Pr=0.005$ ، و tps هو التأخير الزمني للأمواج المتحولة Ps المتولدة عند سطح Moho مقارنة بالموجة P المباشرة، ومتوسط السرعات المعتمدة عالمياً لكل من الأمواج P والأمواج S ضمن هذا النطاق (القشرة و المعطف العلوي) هي بحدود:

Velocity S = VS=3.6 km/sec - Velocity P = Vp = 6.2 km/sec

بعد ذلك حُسبَ العمق أسفل كل من المحطتين (HAWK,BIDA) وكان كما يلي:

1- عمق الموهو Moho أسفل محطة حاويك HAWK الحاوية على سجلات زلزالية

H= 33 km tps =4 sec قصيرة الدور

2- عمق الموهو Moho أسفل محطة البيضا BIDA الحاوية على سجلات زلزالية واسعة

H= 31km tps = 3.8 sec الاستجابة الطيفية

الجدول (ب) يوضح الهزات المستخدمة في الدراسة

| Date | Time UTC | Latitude | Longitude | Depth | Magnitude | Region Name |
|------------|----------|----------|-----------|-------|-----------|----------------------------------|
| 09/12/2009 | 09:46:08 | -22.28 | 171.01 | 90 | 6.5 | SOUTHEAST OF LOYALTY ISLANDS |
| 24/11/2009 | 12:47:17 | -20.57 | -173.38 | 60 | 6.8 | TONGA |
| 13/11/2009 | 03:05:59 | -19.41 | -70.3 | 43 | 6.5 | OFFSHORE TARAPACA, CHILE |
| 09/11/2009 | 10:44:54 | -17.18 | 178.45 | 584 | 7.1 | FIJI |
| 08/11/2009 | 19:41:45 | -8.3 | 118.74 | 20 | 6.8 | SUMBAWA REGION, INDONESIA |
| 30/10/2009 | 07:03:40 | 29.23 | 129.94 | 40 | 6.9 | RYUKYU ISLANDS, JAPAN |
| 24/10/2009 | 14:40:45 | -6.16 | 130.43 | 145 | 7 | BANDA SEA |
| 08/10/2009 | 08:28:45 | -13.16 | 166.03 | 10 | 6.8 | VANUATU |
| 08/10/2009 | 02:12:39 | -11.6 | 166.14 | 30 | 6.6 | SANTA CRUZ ISLANDS |
| 07/10/2009 | 23:13:48 | -13.04 | 166.33 | 26 | 7.4 | VANUATU |
| 07/10/2009 | 22:18:23 | -12.57 | 166.35 | 10 | 7.8 | SANTA CRUZ ISLANDS |
| 07/10/2009 | 22:03:15 | -12.98 | 166.33 | 30 | 7.6 | SANTA CRUZ ISLANDS |
| 07/10/2009 | 21:41:14 | 4.1 | 122.57 | 583 | 6.8 | CELEBES SEA |
| 04/10/2009 | 10:58:01 | 6.74 | 123.51 | 628 | 6.5 | MORO GULF, MINDANAO, PHILIPPINES |
| 01/10/2009 | 01:52:29 | -2.49 | 101.57 | 10 | 6.6 | SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA |
| 30/09/2009 | 10:16:09 | -0.76 | 99.84 | 80 | 7.6 | SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA |
| 29/09/2009 | 17:48:11 | -15.42 | -172.13 | 10 | 8.1 | SAMOA ISLANDS REGION |
| 02/09/2009 | 07:55:04 | -7.78 | 107.41 | 70 | 7.1 | JAVA, INDONESIA |
| 28/08/2009 | 01:51:19 | -7.17 | 123.42 | 633 | 6.8 | BANDA SEA |
| 17/08/2009 | 00:05:47 | 23.5 | 123.58 | 10 | 6.7 | SOUTHWESTERN RYUKYU ISL., JAPAN |
| 16/08/2009 | 07:38:24 | -1.42 | 99.46 | 30 | 6.7 | KEP. MENTAWAI REGION, INDONESIA |
| 10/08/2009 | 19:55:38 | 14.06 | 92.9 | 25 | 7.6 | ANDAMAN ISLANDS, INDIA REGION |

الخلاصة

يمكن عدّ النتائج التي تم الحصول عليها بطريقة تابع المحطة مقبولة -إلى حد ما- مقارنة بالدراسات السابقة التي حددت زمن وصول الطور PS عند 4 ثانية تقريباً، ومن ثمّ يمكن أن تؤخذ - بالحسبان- وأن تُطبّق الكودات الموضوعة على محطات الشبكة الوطنية للرصد الزلزالي كلّها، وأن تُدرس دراسات تفصيلية من حيث دراسة بنية القشرة الأرضية وتركيبها في سورية ونمذجة السرعة أسفل المحطات.

لُوحظ من خلال الدراسة أن تقنية الحساب التكراري لفك التثني المستخدمة في تقدير تابع المحطة ذات فعالية جيدة في حال استخدام إشارات زلزالية عالية الجودة وغير حاوية على الضجيج، وهذا الأمر لم يكن متوافقاً بالقدر الكافي في معظم الهزات، وهذا ما جعل هذه التقنية أقل كفاءة من طريقة مستوى الماء في حساب فك التثني.

أمّا طريقة مستوى الماء فتأتي أهميتها من قدرتها على التخلص من تأثير القيم الصغيرة للتردد؛ ممّا يجعل العملية مستقرة -إلى حد ما- (Stable) التي عُدّت بمنزلة مصفي يمرر الترددات المنخفضة عند تطبيقه على كثافة طيف طاقة مقام النسبة بين طيفي السعة (المركبة العمودية) الذي يكون له تأثير بصري واضح في التخلص من الترددات العالية فضلاً عن أنها سريعة وبسيطة نسبياً.

REFERENCES

- Zhu, L. and H. Kanamori. (2000). Moho depth variation in southern California from Teleseismic receiver functions, *Journal of Geophysical Research*, 105, B2, pp. 2969-2980.
- Cassidy, J. F. (1992). Numerical experiments in broadband receiver function analysis. *Bulletin of Seismological Society of America*, 82:1453-1474.
- Langston, C. A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from Teleseismic body waves. *Journal of Geophysical Research*, 84: 4749-4762.
- Di Bona M. (1998). Variance estimate in frequency-domain deconvolution for Teleseismic receiver function computation. *Journal of Geophysical Research*, 134: 634-646.
- Ammon, C. J. (1991). The isolation of receiver effects from teleseismic P-waveforms, *Bulletin of Seismological Society of America*, 81, 6: 2504 –2510.
- Ligorria J.P., Ammon C.J. ,(1999) Iterative deconvolution and receiver-function Estimation *Bulletin of Seismological Society of America*, 89(5):1395-1400.
- Kathryn, A. Pesce. (2010). Comparison of Receiver Function Deconvolution Techniques. Submitted to the Department of Mechanical Engineering.
- Samer, Bagh. Ph. D. Thesis. (2005). Seismotectonics and Crustal Structure of the Abruzzo Region (Central Italy). Through the Analysis of Seismic Data Registered by a Local Network *Universita' Degli Studi Di Perugia*.
- Yaman, Özakin. (2008). Crustal Structure Of Southwestern Anatolia Using Receiver Function Analysis. B. S. Physics. Bogaziçi University.