جامعة دمشق
المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية
قسم علم الزلازل
ماجستير تأهيل وتخصص
العام الدراسي 2019-2020

Ground Motion Prediction Equations
معادلات تقدير الحركات الأرضية

د. رامي ابراهيم

Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)
معادلات تقدير الحركات الأرضية

Engineering seismology is the link between earth sciences and engineering. The main input of engineering seismology in engineering design are loading conditions which might satisfy certain conditions regarding their level and frequency of occurrence during the lifetime of structure. One method for estimating these loading conditions is through equations based on strong ground motion recorded during previous earthquakes. These equations are called “Ground Motion Prediction Equations abbreviated as GMPEs” and previously called “Attenuation Relationships” or “Attenuation Equations” or “Attenuation Models”.

يعتبرعلم الزلازل الهندسي صلة الوصل بين علوم الأرض والهندسة. يقدم علم الزلازل الهندسي معلومات هامة للتصميم الهندسي كشروط الأحمال مثل مستوى تلك الأحمال وتكراريتها خلال فترة عمر المنشأ. إن الطريقة الأنسب لتقديرتلك الأحمال تكون من خلال إنشاء معادلات تعتمد على تسجيلات للحركات الأرضية القوية مسجلة خلال زلازل سابقة. تسمى تلك المعادلات بمعادلات تقدير الحركات الأرضية واختصاراً (GMPEs) وسميت سابقاً بعلاقات التخامد أو معادلات التخامد أو موديلات التخامد.

Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)
معادلات تقدير الحركات الأرضية

What are GMPEs?

Equations giving the mean and standard deviation of measures of ground motion as a function of magnitude, distance, site conditions, and some other variables.

ماهي علاقات تقدير الحركات الأرضية؟

هي معادلات تعطي تقديراً للقيمة الوسطية وللانحرافات المعيارية للحركات الأرضية كتابع للقدر والمسافة وتأثير الموقع وبعض المتغيرات الأخرى.

What are GMPEs useful for?

Ground Motion Prediction Equations are vital for Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA), Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), and some other engineering applications such as Earthquake Early Warning systems (EEW).

ماهي أهمية علاقات تقدير الحركات الأرضية؟

تعتبر علاقات تقدير الحركات الأرضية مركبة هامة جداً لتحليل المخاطر الزلزالية بالطريقة التحديدية وكذلك بالطريقة الاحتمالية كما تعتبر ذات أهمية لبعض التطبيقات الهندسية مثل أنظمة الأنذار المبكر.

Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)

معادلات تقدير الحركات الأرضية

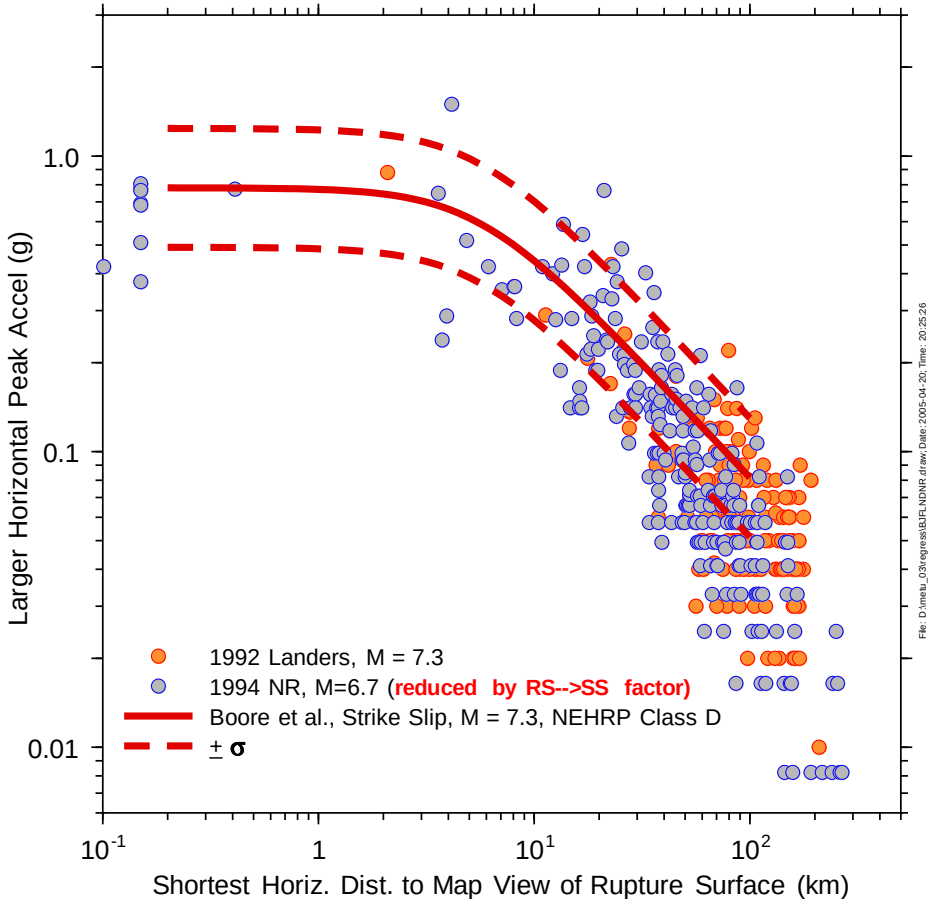


Figure shows mean (solid line) and standard deviation (dashed line) of peak ground acceleration value taken as the largest horizontal component versus shortest distance to map view of rupture surface

يظهر الشكل مثالاً عن القيمة الوسطية (الخط الأحمر السميك) والانحرافات المعيارية (الخطوط الحمراء المتقطعة) لقيم ذروة التسارعات الأرضية مأخوذة كقيمة أعلى مركبة من بين المركبتين الأفقيتين ويدل المحور الأفقي على مقياس المسافة مأخوذ كأقصرمسافة أفقية من محطة الرصد الزلزالي إلى المسقط الأفقي لمنطقة التمزق على سطح الأرض.

How to measure distance used for GMPEs?

كيف يتم قياس المسافة المستخدمة لعلاقات تقدير الحركات الأرضية؟

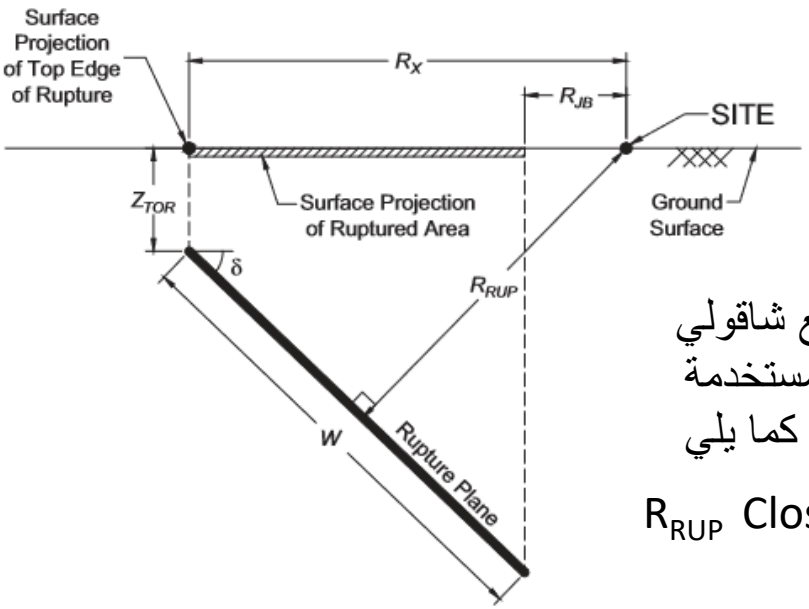


Figure illustrates earthquake source and distance measures using a vertical cross-section through a fault rupture plane. There are several measures used in GMPEs to measure the distance between the site and fault plane as follows,

شكل يوضح المنبع الزلزالي وطريقة قياس المسافة باستخدام مقطع شاقولي خلال مستوي التمزق الفالقي و هنالك العديد من مقاييس المسافة المستخدمة في علاقات GMPEs لقياس المسافة بين الموقع ومستوي الصدع كما يلي

R_{RUP} Closest distance to the rupture plane (rupture distance)

أقرب مسافة إلى مستوي التمزق (المسافة عن التمزق)

R_{JB} Horizontal distance to the surface projection of the rupture (Joyner-Boore distance)

المسافة الأفقية إلى مستوى الاسقاط السطحي لمستوي التمزق (المسافة حسب جوينر- بوور)

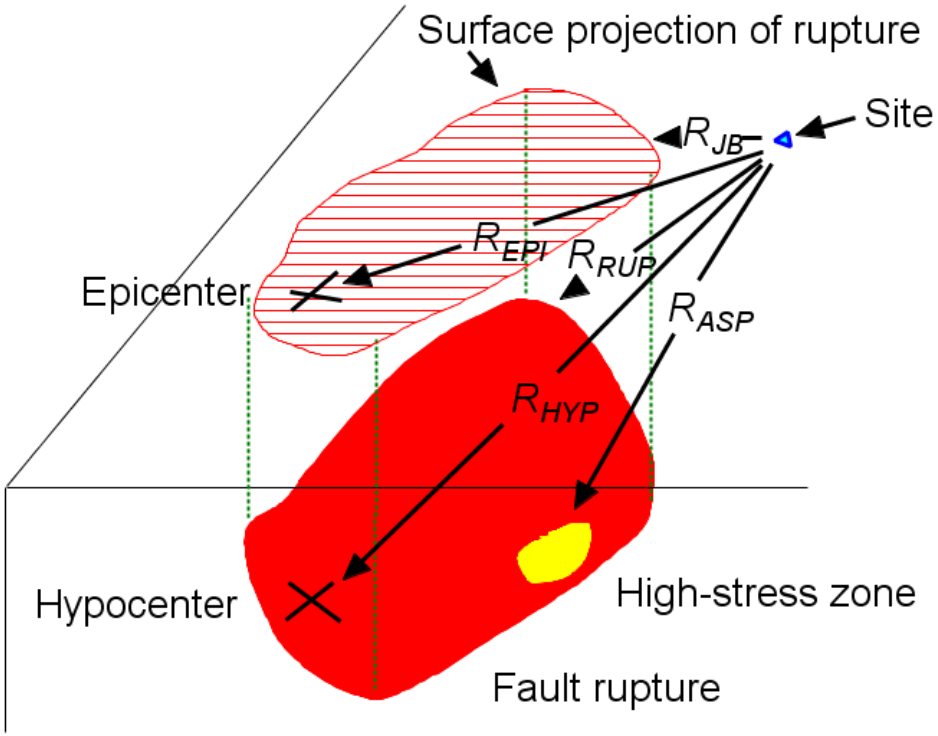
R_X Horizontal distance to top edge of rupture measured perpendicular to the strike (site coordinate).

المسافة الأفقية إلى الحافة العليا لمستوى التمزق مقاسة بشكل معامد لخط الاتجاه (وذلك حسب إحداثيات الموقع)

Depth-to-top of rupture, Z_{TOR}

العمق إلى قمة مستوي التمزق

How to measure distance used for GMPEs?
كيف يتم قياس المسافة المستخدمة لعلاقات تقدير الحركات الأرضية؟



Another figure show the projection of the rupture area on the surface. Another measure can be used to estimate the distance such as:

R_{HYP} Distance to the Hypocenter
المسافة إلى بؤرة الزلزال

R_{EPI} Distance to the Epicenter
المسافة إلى مسقط البؤرة على سطح الأرض

R_{ASP} Distance to the Asperity (High-stress zone)
المسافة إلى منطقة التمزق الأعظمي
(نطاق الإجهاد الأعظمي)

It is noted that there is no standard, although the closest distance to the rupture plane is probably the distance most commonly used. It is also noted that the distance measure must be something that can be estimated for a future earthquake.

على الرغم من أنه لايوجد مقياس مرجعي للمسافة إلا أن أقرب مسافة إلى مستوي التمزق هي الأكثر شيوعاً بين علاقات تقدير الحركات الأرضية. كما يجب الملاحظة إلى أن مقياس المسافة يجب أن يحمل التمثيل الأفضل للبعد عن الزلزال المتوقع حدوثه في المستقبل.

How to use two horizontal components?
كيف تمثل الحركة الأرضية على المركبات الأفقية؟

It is well known that GMPEs mostly use the ground motion on the horizontal components and it is rarely used on the vertical component, that is because the damage could be related to the horizontal components comparing to the vertical one.

من المعروف أن الحركة الأرضية تمثل بشكل كبير على المركبات الأفقية ونادراً مايتم تمثيلها على المركبات الشاقولية لأن الحركة الأفقية غالباً ماتكون مسؤولة عن إحداث الضرر للمنشأت مقارنة مع المركبة الشاقولية

How to use two horizontal components? **كيف يتم استخدام المركبتين الأفقيتين؟**

1)Use both independently 1) يمكن استخدام كلا المركبتين بشكل مستقل

2)Use larger component 2) يمكن استخدام المركبة ذات القيمة الأعلى

3)Use larger component 3) يمكن استخدام قيمة الجذر التربيعي لمجموع المركبتين الأفقيتين

$$A = \sqrt{A_{NS}^2 + A_{EW}^2}$$

4)Use the geometric mean 4) يمكن استخدام قيمة الجذر التربيعي لناتج ضرب المركبتين الأفقيتين

$$A = \sqrt{A_{NS} \times A_{EW}}$$

What measure of ground motion to use?

ماهو مقياس الحركات الأرضية الأنسب؟

Ground motion prediction equations can predict the following parameters

1- Peak Ground Acceleration (PGA)

2- Peak Ground Velocity (PGV)

3- Peak Ground Displacement (PGD)

4- Pseudo Spectral Acceleration (PSA)

تلخص المعاملات التي تقدر بمعادلات تقدير الحركات الأرضية كما يلي:

1) ذروة التسارع الأرضي
2) ذروة السرعة الأرضية
3) ذروة الإزاحة الأرضية
4) التسارع الطيفي الشبيه

The ground motion depends on basic predictor variables such as

- Moment magnitude which considered the most common measure used by GMPEs
- Distance between the source and site
- Site characterization

يعتمد تقدير الحركات الأرضية على مجموعة معاملات أساسية مثل

- القدر الزلزالي حيث يعتبر قدر العزم الزلزالي الأكثر شيوعاً من بين القدور الأخرى
- المسافة بين المصدر الزلزالي والموقع
- خصائص الموقع

Additional parameters used by GMPEs
المعاملات الإضافية المستخدمة في تقدير الحركة الأرضية

There are several parameters used for more accurate estimate of the ground motion such as

- Basin depth
- Hanging wall
- Depth to the top of rupture
- Fault dip
- Event class (mainshock/aftershock)
- etc.

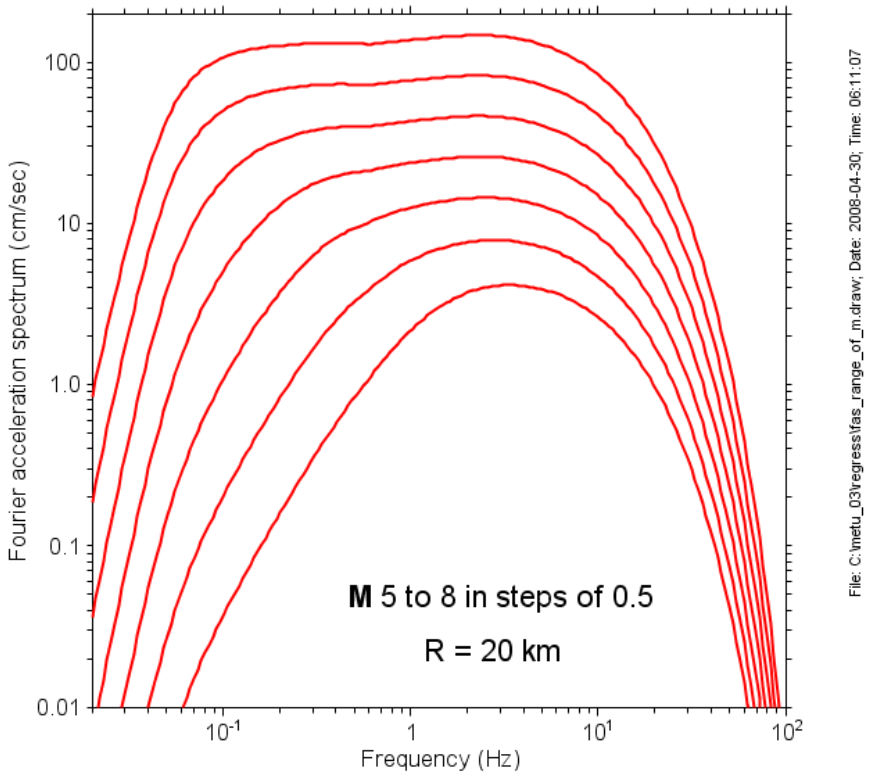
هنالك مجموعة عوامل إضافية تساعد على التقدير الصحيح للحركة الأرضية مثل

- عمق الحوض الرسوبي
- تأثير الجدار المعلق
- المسافة التي تفصل بين سطح الأرض و الحافة العليا لمستوى التمزق
- زاوية ميل مستوي الصدع
- تصنيف الزلزال فيما إذا كان هزة رئيسية أو هزة ارتدادية
- ألخ.

The dependency of ground motion on magnitude
تأثر الحركة الأرضية بالقدر الزلزالي؟

Source scaling theory predicts a general increase with magnitude for a fixed distance

تتأثر الحركة الأرضية بالقدر الزلزالي حيث يلاحظ ازديادها مع زيادة القدر على مسافة ثابتة



The following figure shows the theoretical calculation of Fourier spectra for earthquakes range from 5 to 8 in steps of 0.5 at fixed distance of 20 km. The spectrum increases with increasing magnitude.

يظهر الشكل التالي طيف فوريه المحسوب نظرياً لزلازل تتراوح بين قدر 5 إلى 8 تتزايد بخطوة 0.5 على مسافة 20 كم. تزداد الأطياف بزيادة القدر الزلزالي.

The dependency of ground motion on distance
تأثر الحركة الأرضية بالبعد عن المصدر الزلزالي

Generally, it will decrease (attenuate) with distance, but wave propagation in a layered earth predicts more complicated behavior (e.g., increase at some distances due to critical angle reflections ("Moho-bounce")

Equations assume average over various crustal structures

تتخامد الحركة الأرضية بشكل عام مع زيادة البعد عن المصدر المولد للزلازل ولكن قد تتأثر الأمواج الزلزالية ببعض الانعكاسات أثناء انتشارها فقد تزداد أحياناً نتيجة ارتطامها بطبقة الموهو.

تعطي معادلات الحركات الأرضية قيمة وسطية فوق بنيات متعددة للقشرة الأرضية.

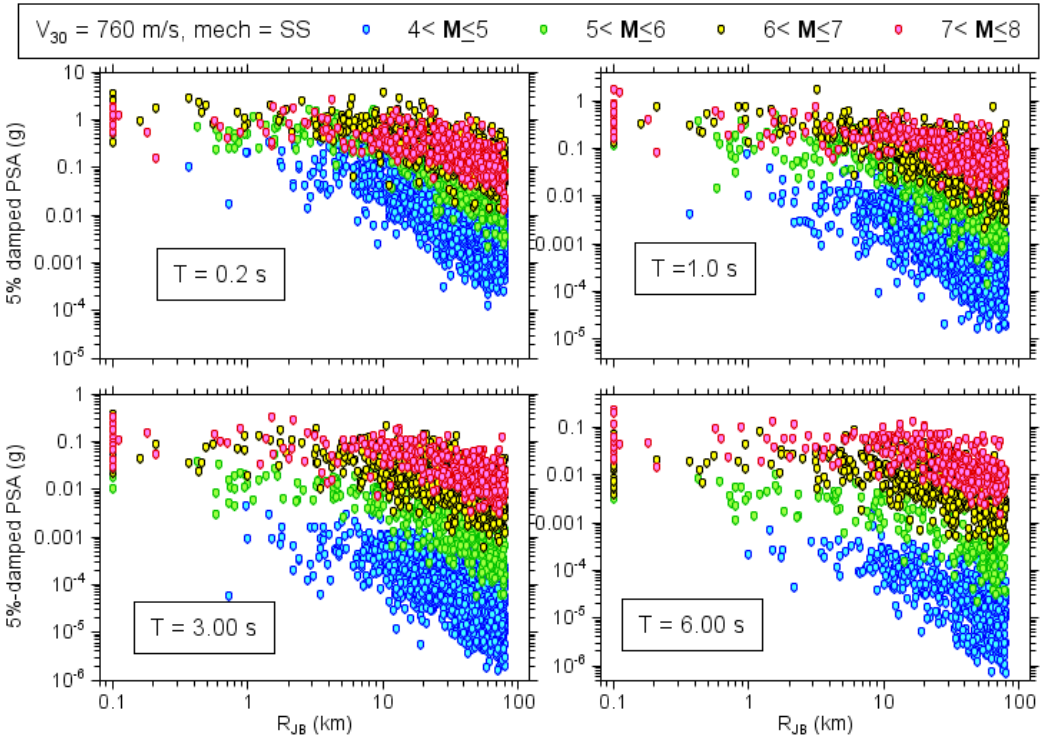


Figure shows the ground motion distribution versus distance for different data differs by magnitude. The ground motion attenuates with distance.

يظهر الشكل توزع الحركة الأرضية مع المسافة لمعطيات زلزالية تختلف بإختلاف القدر الزلزالي. تتخامد الأمواج مع المسافة.

The dependency of ground motion on site effect
تأثر الحركة الأرضية بتأثير الموقع

Local site conditions at a seismic station can dramatically affect the strong ground motion. Average shear wave of top 30 meters of soil V_{s30} is most commonly used to predict for site effect given in the following equation, *H* is the thickness of each layer, *Vs* is the shear wave velocity of each layer, *i* index refers to each layer

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{N} \frac{H_i}{Vs_i}}$$

قد تؤثر ظروف الموقع بشكل كبير على الإشارة الزلزالية، حيث تعتبر القيمة الوسطية لسرعة أمواج القص في 30 متر العليا من التربة هي الأكثر شيوعاً لتقدير تأثير الموقع ويعبر عنها بالعلاقة الموضحة أعلاه

TABLE 4.
Definition of NEHRP site classes (BSSC, 1994)

Site Class	Range of Shear Velocities*
A	greater than 1500 m/sec
B	760 m/sec to 1500 m/sec
C	360 m/sec to 760 m/sec
D	180 m/sec to 360 m/sec
E	less than 180 m/sec

* Shear velocity is averaged over the upper 30 m.

Table shows the site classification according to the National Earthquake Hazard Reduction Program of USA. It is divided into five categories according to V_{s30} value.

تظهر القائمة تقسيمات الموقع حسب برنامج تخفيض المخاطر الزلزالية في الولايات المتحدة الأمريكية حيث قسمت إلى خمس فئات طبقاً لقيمة السرعة الوسطية لسرعة أمواج القص في 30 متر العليا من التربة.

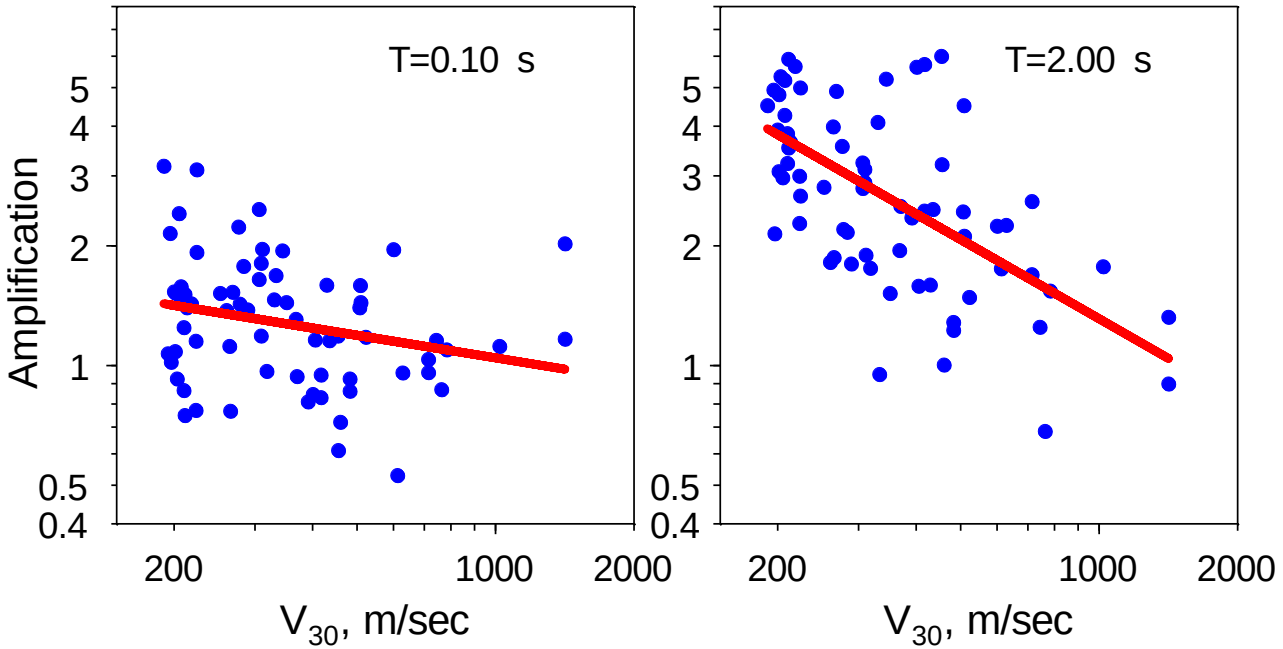
The dependency of ground motion on site effect
تأثر الحركة الأرضية بتأثير الموقع

Site amplification factors versus average shear wave of top 30 meters of soil V_{s30}

Blue dots refer to amplification factor of each site and red line refers to fitting line.

يوضح الشكلين في الأسفل قيم تضخيم الموقع مع تغيرات القيمة الوسطية لسرعة أمواج القص في 30 متر العليا من التربة. حيث تشير النقط الزرقاء إلى معاملات التضخيم ويشير الخط الأحمر إلى منحني الملائمة على دوري 0.1 و 2 ثانية.

slope = b_v, where $Y \propto (V_{30})^{b_v}$



Selecting of mathematical function
اختيار التابع الرياضياتي

It is an important issue to select an appropriate mathematical function to represent the ground motion prediction equation that model the variables. The functional form of the model will depend, in general, on the use of the relationship and the database selected.
If the database represents a relatively uniform subset of data (i.,e. with distance and with magnitude) then a function having only a few parameters would be appropriate, then relatively simple empirical model would be justified.

من المهم اختيار تابع رياضياتي ملائم لتمثيل معادلات تقدير الحركة الأرضية وفقاً للمتغيرات الموجودة.
يتم وضع معادلة تقدير الحركة الأرضية حسب الهدف من الدراسة واعتماداً على قاعدة البيانات التي تم اختيارها.
إذا كانت قاعدة البيانات التي تم تجميعها مثالية من حيث توزع المعطيات مع المسافة أو مع القدر عندئذ يمكن تمثيل البيانات بتابع بسيط يحوي بعض المعاملات.

Selecting of mathematical function
اختيار التابع الرياضياتي

Usually, the model for a GMPE is written as

يعبر عن معادلة تقدير الحركات الأرضية بالصيغة التالية

$$log\ A = f(M,etc.) + g(X,etc.) + c + \sigma$$

In this equation *f(M,etc.)* includes terms accounting for **seismic source** such as for magnitude(M), faulting style (Normal, Reverse, Strike-slip), focal depth (D), and tectonic regime (Stable continental regions (SCR), shallow earthquakes in active tectonic regions (ACR), and subduction zone (SZ)).

يتضمن *f(M,etc.)* معاملات تعبر عن المصدر الزلزالي مثل القدر الزلزالي ونمط التصدع (عادي، عكسي، أو إزاحة جانبية) وعمق البؤرة والنظام التكتوني العام (مناطق مستقرة تكتونياً، زلازل ضحلة العمق في مناطق تكتونية نشطة، و زلازل تقع ضمن نطاق الإنغراس).

g(X,etc.) represents the path term depends on wave types, velocity and Q profile, focal depth and probably magnitude.

يمثل *g(X,etc.)* تأثير المسار والذي يعتمد على نمط الأمواج وسرعتها وكذلك على برفيل معامل الجودة وعمق البؤرة الزلزالية وممكن ايضاً أن تشمل تأثير القدر الزلزالي

Selecting of mathematical function

اختيار التابع الرياضياتي

In some models path term can be simply considered in the form shown in the following equation

يمكن التعبيرعن تأثير الموقع في بعض الموديلات بالصيغة التالية

$$g(X) = b\log(X + C) - kX$$

b is the regression coefficient showing attenuation by geometric spreading. In some models, *b* is forced to the value of -1 for body waves and -0.5 for surface wave. X is the distance between source and site.

أن *b* معامل مشتق من عملية الإنحدار والذي يمثل التخامد الناتج عن الإنتشار الهندسي ويأخذ القيمة 1- للأمواج الجسمية و 0.5- للأمواج السطحية.

C shows the saturation of near field ground motions at close distances close to the source. It is found that PGA attenuation at distances close to the fault where little geometrical spreading attenuation is expected. The following relationship is often used to model *C*

$$C = c_1 \exp(c_2 M)$$

c_1 and c_2 are regression coefficients.

يعبر المعامل *C* عن إشباع الحركة الأرضية على المسافات القريبة من المصدر. حيث وجد أن تخامد ذروة التسارع الأرضي على المسافات القريبة من الصدع ترتبط أكثر بالقدر الزلزالي أكثر منه بالانتشار الجيومتري.

k represents the inelastic attenuation in the medium

تمثل التخامد غير المرن للوسط

Procedures to derive GMPEs
الإجراءات المتبعة لاشتقاق معادلات تقدير الحركات الأرضية

The complete procedure that needs to be followed to derive ground motion estimation equations using recorded strong-motion data is outlined below:

تلخص الإجراءات المتبعة لإشتقاق علاقات تقدير الحركات الأرضية باستخدام معطيات الحركات القوية كما يلي:

(1) Earthquakes are recorded using strong-motion instruments to get a set of records for analysis.

1) يجب أن تكون الزلازل مسجلة بأجهزة رصد حركات قوية واختيار مجموعة من التسجيلات لكي يتم اعتمادها في التحليل.

(2) If the earthquakes were recorded on analogue accelerographs, which use paper, then the accelerograms are digitized to get the data into a form usable for numerical analysis.

2) إذا كانت الزلازل مسجلة بأجهزة رصد تشابهية مستخدمين سجلات ورقية فيجب أن ترقمن تلك التسجيلات.

(3) The digitized strong-motion records are processed to remove short- and long-period noise. This processing usually consists of fitting a zero baseline to the record and then applying a bandpass filter.

3) تعالج تسجيلات الحركات القوية لإزالة الضجيج طويل وقصير الدور. كما تتم عادة مطابقة التسجيل مع المستوى الصفري ويطبق مصفي واسع الطيف.

Procedures to derive GMPEs
الإجراءات المتبعة لاشتقاق معادلات تقدير الحركات الأرضية

(4) A dependent variable is selected and calculated from the strong-motion records. This dependent variable, such as peak ground acceleration or spectral acceleration, should be useful for seismic design and analysis.

4) يتم اعتماد متغير مرتبط من تسجيلات الحركات القوية مثل ذروة التسارع الأرضي أو التسارع الطيفي ويعتبر هذين المعاملين هامين للتصميم وتحليل المنشأت المقاومة للزلازل.

(5) Independent variables, such as magnitude and source-to-site distance, that characterize the strong motion records in the data set are then collected for all the time-histories used.

5) يتم تجميع المتغيرات المستقلة مثل القدر و المسافة بين المصدر والموقع من كل التسجيلات والتي تحدد خصائص الحركات الأرضية.

(6) Regression analysis is performed to derive equations to estimate the dependent variable (a strong-motion parameter) given the independent variables. At the same time, the standard deviation of the equations are calculated.

6) يتم تحليل المعطيات بعملية الانحدار الاحصائية لاشتقاق المتغيرات المستقلة وكما يتم تحديد قيمة الانحرافات المعيارية لكل معادلة.

GMPEs for Syria
معادلة تقدير الحركات الأرضية لسوريا

A GMPE for peak ground acceleration valid for the Syrian territory was proposed by Alchlabi et. al. (2004). The dataset consisted of 49 PGAs obtained from 10 earthquakes recorded by the Syrian National Seismological Network (SNSN). The GMPE proposed has the following form

$$\log(A) = b_0 + b_1.M_c + b_2.log(r) + b_3.S$$

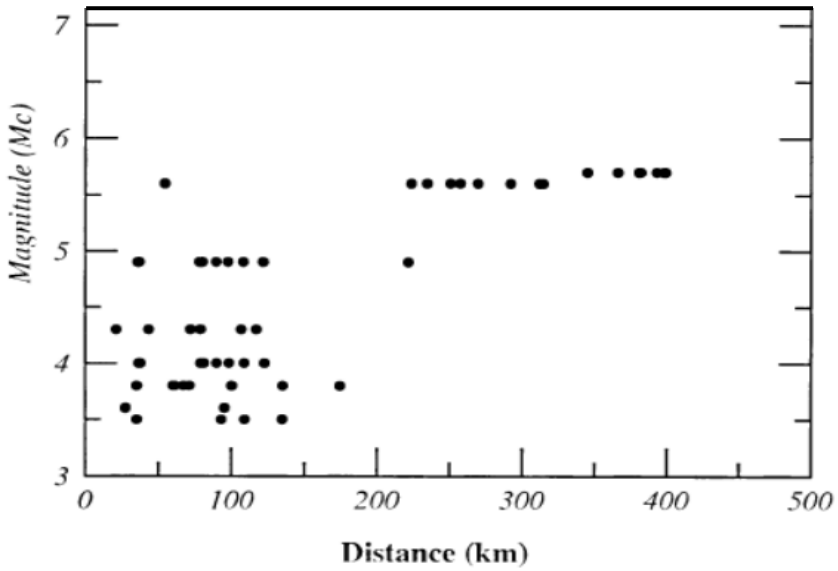
Where A is the PGA (for horizontal and vertical components), M_c is the coda magnitude, b_i is the regression coefficient to determined by the regression analysis. S is the soil coefficient (0 for bedrock and 1 sediments), r is the hypocentral distance between the event and the station.

تم وضع علاقة لتقدير الحركات الأرضية وتحديداً قيمة ذروة التسارع الأرضي لسوريا من قبل الشلبي وآخرون عام (2004). تتألف قاعدة البيانات من 49 تسجيلاً تم تجميعها من 10 زلازل سجلت بالشبكة الوطنية للرصد الزلزالي.

تأخذ المعادلة المشتقة الصيغة الموضحة أعلاه.

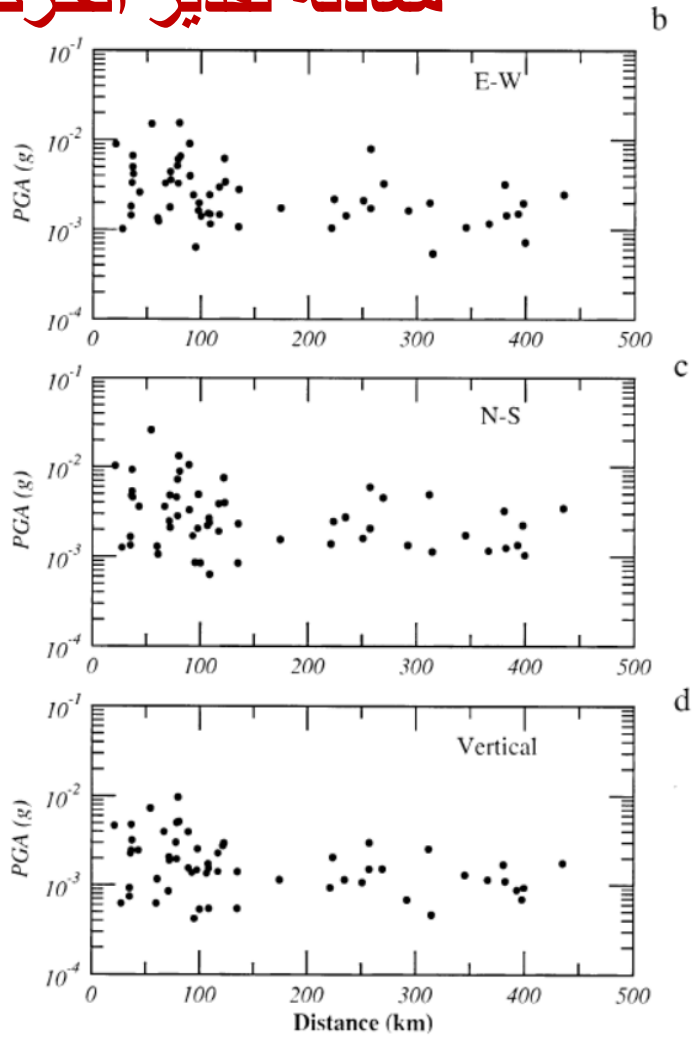
حيث تشير A إلى قيمة ذروة التسارع الأرضي للمركبتين الأفقيتين والمركبة الشاقولية، Mc هي قدر الزلزال مقدر من أمواج الكودا. S هي معامل للتربة (0 لصخر الأساس و 1 للرسوبات)، r هي المسافة بين الزلزال والمحطة.

GMPEs for Syria
معادلة تقدير الحركات الأرضية لسوريا



The distribution of magnitude versus distance for the data used to derive GMPE for Syria (Alchalbi et. al. 2004)

توزع القدر الزلزالي مع المسافة للمعطيات المستخدمة لاستخراج معادلة تنبؤ الحركات الأرضية لسوريا (الشلبي وآخرون 2004).



The distribution of PGA versus distance for three components

توزع قيم ذروة التسارع الأرضي مع المسافة للمركبات الثلاث.

GMPEs for Syria
معادلة تقدير الحركات الأرضية لسوريا

According to Alchalbi et. al. (2004), the results of the regression analysis provided very small values for coefficient b3, so they neglected it and did the regressions again imposing b3=0. The obtained coefficients of the attenuation laws for both vertical and horizontal components are given in below table.

وجد الشلبي وآخرون (2004) أن قيمة المعامل b3 الناتجة من عملية تحليل الانحدار صغيرة جداً لذلك فقد أهملت تلك القيمة ونفذت العملية مرة أخرى. تم إعطاء القيمة النهائية للمعاملات كما في القائمة الموضحة بالأسفل

No.	Components	No. Of records	Actual distance range	Min M_c	Max M_c	Standard deviation	b0	b1	b2
1	Horizontal	49	21-400	3.5	5.8	0.259	-1.939	0.278	-0.858
2	Horizontal	22	36-400	4.8	5.8	0.249	-0.835	0.126	-0.981
1	Vertical	49	21-400	3.5	5.8	0.264	-2.367	0.244	-0.752
2	Vertical	22	36-400	4.8	5.8	0.216	-1.242	0.061	-0.816

For example, the obtained GMPE for the horizontal component for the events with 3.5 < Mc < 5.8 is:

فمثلاً تعطى علاقة تقدير الحركة الأرضية للمركبة الأفقية ولأحداث يتراوح قدرها بين 3.5 و 5.8 بالعلاقة التالية

$$\log(A) = -1.939 + 0.278Mc - 0.858\log(r)$$

*M*c: coda magnitude

r : hypocentral distance

References
المراجع

- Alchalbi A., G. Costa, and P. Suhadolc (2004). Strong motion records from Syria: A preliminary analysis. *SE-40EEE*.

- Douglas J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews 61 43-104.*

- IAEA-TECDOC-1796. Seismic hazard assessment in site evaluation for nuclear installations: ground motion prediction equations and site response. *International Atomic Energy Agency, Vienna. ISBN 978-92-0-105516-3 ISSN 1011-4289*.