إدراج صنف الموقع في توابع الهشاشة الزلزالية: منهجية قائمة على استخدام المتغيرات الوهمية

الدكتورة حنان حسين*

ملخص

في هذه الورقة البحثية نخطو خطوة نحو الأمام في تطوير منحنيات الهشاشة الزلزالية بحيث تأخذ هذه المنحنيات بعين الاعتبار الصنف الزلزالي للموقع مما يسهم في رفع كفاءة هذه الأدوات التقييمية. تعتمد المنهجية التي اتبعناها على إدراج صنف الموقع كمتغير مستقل في تابع احتمالية الضرر الزلزالي لجسور بيتونية من خلال استخدام المتغيرات الوهمية. لتحقيق ذلك قمنا باعتماد نموذج احتمالي مناسب قادر على التعامل مع البيانات الثنائية للضرر الزلزالي (تضرر، عدم تضرر)، ويقبل بنفس الوقت متغيرات فئوية (أصناف الموقع) وهو نموذج الانحدار اللوجستي الثنائي، وقد تم استخدام قاعدة بيانات ضرر ناتجة عن تحليل ستاتيكي لاخطي لعدد كبير من العينات التي تمثل نوع الجسر المدروس والمعرَّضة لشدات زلزالية متنوعة مع الأخذ في الاعتبار أربعة أصناف رئيسية للموقع. أظهرت النتائج أن النموذج المقترح لتابع الضرر مقبول من الناحية الإحصائية إذ تميز بقدرة تنبؤية جيدة جداً تراوحت بين 73.8% و96.7% (حسب حالة الضرر)، مع زيادة في موثوقية التقديرات الاحتمالية من خلال تفسير التباين الكبير في الاستجابة الزلزالية حسب صنف الموقع والتمييز بين هذه الأصناف بشكل مباشر.

كلمات مفتاحية: منحنيات الهشاشة الزلزالية، المتغيرات الوهمية، الانحدار اللوجستي، صنف الموقع.

* مدير أعمال - قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
hanan.hussein@latakia-univ.edu.sy

Incorporating the Site Class into the Seismic Fragility Functions: A Methodology Based on the Use of Dummy Variables

Dr. Hanan Hussein*

ABSTRACT

In this research, we take a step forward in developing seismic fragility curves that take into account the seismic site class, which contributes to enhancing the efficiency of these assessment tools. The adopted methodology based on incorporating the site class as an independent variable into the probability seismic damage function of concrete bridges using dummy variables. To achieve this, we employed a suitable probabilistic model capable of handling binary seismic damage data (damaged, undamaged) while also accepting categorical variables (site classes)—namely, the binary logistic regression model. We adopted a damage database resulting from nonlinear static analysis of a large number of samples representing the studied bridge type, subjected to various seismic intensities, while considering four main site classes. The results showed that the proposed damage function model is statistically acceptable, as it demonstrated a very good predictive capability ranged between 73.8% and 96.7% (depending on the damage state), along with increased reliability in probability estimates by explaining

* Work Manager - Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.
hanan.hussein@latakia-univ.edu.sy

the significant variation in seismic response according to site class and directly distinguishing between these classes.

Keywords: seismic fragility curves, dummy variables, logistic regression, site class.

1- مقدمة

تمثل توابع الهشاشة الزلزالية (Seismic Fragility Functions) حجر الزاوية في التقييم الاحتمالي للمخاطر الزلزالية، إذ تعبر عن العلاقة بين شدة الهزة الأرضية واحتمال وصول المنشأ إلى حالة ضرر محددة يمكن أن تمثل انهياراً كلياً أو جزئياً أو أضراراً طفيفة. ازداد الاهتمام بهذه التوابع في السنوات الأخيرة فلم تعد نماذج إحصائية مجردة تهم الأكاديميين فقط، بل تحولت إلى أدوات تخطيط استراتيجية تدعم عمليات اتخاذ القرار، خصوصاً مع التحول الجذري في فلسفة التصميم من مجرد تجنب الانهيار إلى ضمان مستويات معينة للأداء تضمن الحفاظ على الخدمات الحيوية بعد الكارثة الزلزالية، وتخفض زمن التعطيل الاقتصادي والاجتماعي خصوصاً في المنشآت الحيوية والبنى التحتية الأساسية، وهنا تقدم توابع أو منحنيات الهشاشة الأداة الكمية المناسبة لتحديد مستوى الأداء المتوقع لأي منشأ عند أي مستوى من مستويات الشدة الزلزالية.

على مدى العقود السابقة ظهرت دراسات كثيرة وفي مناطق مختلفة من العالم اهتمت بمنحنيات الهشاشة سواء للمباني أو الجسور أو حتى لنماذج إنشائية خاصة، ففي اليابان أجرى Karim & Yamazaki أكثر من بحث من أجل تطوير منحنيات هشاشة تحليلية لمنشآت الطرق السريعة في اليابان من أهمها دراسة قدموا فيها طريقة تحليلية مبسطة مع افتراض توزيع لوغاريتمي طبيعي لمنحنيات الهشاشة واستخدموا هذه المنحنيات التحليلية في المقارنة بين جسور ذات بارامترات إنشائية مختلفة، وبين جسور مع وبدون أنظمة عزل زلزالي [1]. هذا واستفادت أبحاث كثيرة في اليابان في إنشاء منحنيات الهشاشة من بيانات ضرر حقيقية بعد الأحداث الزلزالية المتكررة، فقد قام .Ioannou et al [2] بإنشاء منحنيات هشاشة تجريبية للمباني بالاعتماد على الأضرار المسجلة في آلاف المباني بعد زلزال توهوكو عام 2011. قامت D'Ayala بالمشاركة مع باحثين مختلفين على مدى سنوات وحتى الوقت الحاضر بسلسلة من الأبحاث ركزت فيها على تطوير منحنيات هشاشة للمباني وبشكل خاص

الحجرية والأثرية منها، وذلك في أكثر من مكان من أوروبا مثل المملكة المتحدة وإيطاليا، وفي واحد من أحدث أبحاثها تم تطوير منهجية لاشتقاق منحنيات هشاشة للمباني غير المسلحة اعتماداً على بيانات واقعية وتم تطبيقها على حالة دراسة في تشيلي [3]. أما الولايات المتحدة الأمريكية فقد شهدت اهتماماً كبيراً بمنحنيات الهشاشة ويظهر هذا الاهتمام جلياً من خلال أبحاث ودراسات مدعومة من جهات علمية ورسمية، ومن أبرزها برنامج HAZUS التابع لوكالة إدارة الطوارئ الفيدرالية (FEMA) الذي يقدم منحنيات هشاشة للمباني والجسور الأمريكية تم تطويرها باعتماد بيانات حقيقية وتحليلية [4]. مع تطور الأبحاث بدا أن النماذج العامة لمنحنيات الهشاشة لم تعد كافية، لذا بدأ التوجه إلى نماذج تراعي الاختلافات التي يمكن أن تؤثر على الاستجابة الزلزالية.

تؤثر خصائص الموقع بشكل كبير على تضخيم أو تخميد الموجات الزلزالية، وبالتالي على استجابة المنشآت الواقعة عليها، ولتكون توابع الهشاشة فعالة يجب أن تعكس هذا التغير في الخصائص. في توابع الهشاشة التقليدية يهمل هذا التأثير لعجز الطرق التقليدية عن دمجه بشكل فعال في صياغة التابع وهذا ما يحد من قدرتها التنبؤية ويقلل من موثوقيتها. يمكن تجاوز هذه المشكلة من خلال صياغة توابع مخصصة لصنف محدد من أصناف الموقع، لكنها تبقى قاصرة وغير قابلة للاستخدام من أجل الأصناف الأخرى. من هنا سعينا في هذه البحث إلى تقديم إطار منهجي يتم فيه دمج صنف الموقع كمتغير أساسي في توابع الهشاشة بحيث نتجاوز النقص الموجود في التوابع التي تهمل هذا التأثير، وفي الوقت نفسه تغني عن إيجاد توابع مخصصة لكل صنف، وسنطبق هذه المنهجية على منشآت الجسور باعتبارها واحدة من أهم البنى التحتية التي تؤدي دوراً أساسياً في تأمين استمرار الحركة والنقل والتواصل.

مفهوم المتغيرات الوهمية

في عالم الهندسة غالباً ما نواجه بيانات لا يمكن قياسها رقمياً بشكل مباشر وإنما يمكن توزيعها في فئات، وهنا يأتي دور المتغيرات الوهمية (Dummy Variables) التي تشكل واحدة من الأدوات الأساسية في النمذجة الإحصائية القياسية [5]. تستخدم هذه المتغيرات لتمثيل البيانات الفئوية (Categorical Data) في النماذج الرياضية التي تتطلب في جوهرها متغيرات كمية. يمكن أن نعرف المتغير الوهمي بأنه متغير رقمي ثنائي القيمة، يأخذ القيمة (1) إذا كانت الملاحظة تنتمي إلى فئة معينة (التي يمثلها هذا المتغير)، والقيمة (0) إذا لم تكن كذلك [6]. يسمح هذا التحويل البسيط بدمج المعلومات النوعية أو الفئوية في النماذج الكمية مما يسهل فهمها وتحليلها، ويوسع نطاق التحليل

الإحصائي ويزيد من دقة النتائج. تكمن أهمية المتغيرات الوهمية في قدرتها على تمييز التأثيرات المختلفة للفئات المتنوعة على المتغير التابع، فبدلاً من افتراض أن لجميع الفئات التأثير نفسه، تسمح المتغيرات الوهمية للنموذج بتقدير تأثير منفصل لكل فئة، مما يؤدي إلى فهم أعمق للعلاقات المعقدة في البيانات[7] .

من الناحية الرياضية، إذا كان لدينا متغير فئوي يحتوي على k فئة، فإننا نحتاج إلى (k−1) متغير وهمي لتمثيله بالكامل. تُعرف الفئة المتبقية بالفئة المرجعية(Reference Category) أو فئة الأساس (Base Category) [8]. يُعد اختيار الفئة المرجعية قراراً مهماً، فهو وإن كان لا يؤثر على النتائج بحد ذاتها، إلا أنه يؤثر على تفسير هذه النتائج. عادة ما يتم اختيار الفئة الأكثر شيوعاً أو الفئة التي تمثل الحالة الطبيعية أو المعيارية كفئة مرجعية. يمكن استخدام المتغيرات الوهمية في العديد من النماذج الإحصائية مثل الانحدار الخطي المتعدد والانحدار اللوجستي سواء المتعدد أو الثنائي الذي تم اعتماده في هذا البحث.

الانحدار اللوجستي الثنائي

الانحدار اللوجستي الثنائي هو أسلوب إحصائي يسمح بنمذجة متغير ثنائي الحد (تحقق حدث /عدم تحققه) بدلالة مجموعة من المتغيرات العشوائية التي قد تكون رقمية أو فئوية [9]، فيكون Y=1 عند تحقق الحدث، و Y=0 في حال عدم تحققه.

يمكن أن تأخذ المدخلات (المتغيرات المستقلة) في علاقة الانحدار اللوجستي أي قيمة من ∞− إلى ∞+، لكن المخرجات تكون دائماً ضمن المجال [1 → 0]، لأن الانحدار اللوجستي لا يعطي قيمة للتابع ثنائي الحد، وإنما احتمال تحقق الحدث الذي يمثله هذا التابع، ويعبر عنه رياضياً بالشكل [10]:

$$f(Z) = P = \frac{e^Z}{1+e^Z} = \frac{1}{1+e^{-Z}}$$

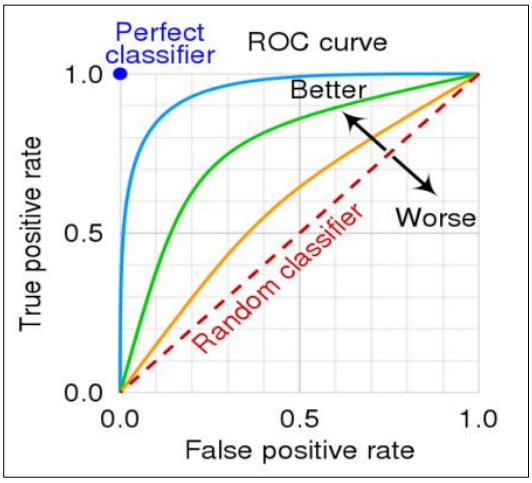
$$Z = logit(P) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i$$

حيث P هي احتمالية حدوث الحدث $P = P(Y = 1)$، X_iهي المتغيرات المستقلة، β_0, β_i هي المعاملات المراد تقديرها.

بعد تقدير معلمات النموذج اللوجستي يجري التحقق من جودة هذا النموذج ومدى قدرته على التنبؤ بالمتغير التابع من خلال عدد من الاختبارات أهمها مصفوفة التشويش والمنحني المميز لأداء المستقبل.

مصفوفة التشويش (Confusion Matrix): مصفوفة التشويش هي أداة أساسية لفهم وتقييم النماذج في مسائل التصنيف المعلّم [11]، تبين هذه المصفوفة عدد الحالات التي تمكن النموذج من التنبؤ بقيمتها الصحيحة وعدد الحالات التي لم يتمكن من التنبؤ بقيمتها الصحيحة من أجل كل الحالات الفعلية التي أخذت القيمة 1 أو القيمة 0، وذلك باعتماد عتبة (cut value) تفصل بين الحالتين، وعادة ما تكون قيمة هذه العتبة 0.5.

المنحني المميز لأداء للمستقبل (Receiver Operating Characteristic): ويسمى اختصاراً منحني (ROC) وهو رسم بياني يعتمد على النتائج التي نعطيها مصفوفة التشويش من أجل قيم مختلفة مفترضة للعتبة الفاصلة (وليس فقط القيمة 0.5)، يمثل هذا المنحني العلاقة بين الحساسية sensitivity ومتمم النوعية specificity، حيث تمثل الحساسية النسبة الصحيحة للقيم التي أخذت القيمة 1، بينما تمثل النوعية النسبة الصحيحة للقيم التي أخذت القيمة 0 وبالتالي متممها هو النسبة الخاطئة للقيم التي أخذت القيمة 1 [12]. يتم تقييم كفاءة النموذج بحساب المساحة تحت هذا المنحني (AUR)، كلما كانت هذه المساحة أكبر كان النموذج أفضل كما هو مبين في الشكل 1، ويمكن اعتماد القيم المبينة في الجدول 1 لتقييم النموذج.



الشكل (1) منحني ROC [12]

الجدول (1) تقييم النموذج بالاعتماد على قيمة AUR [8]

AUR	= 0.5	0.5 →0.7	0.7→0.8	0.8→0.9	> 0.9
التقييم	فشل النموذج	ضعيف	مقبول	ممتاز	متميز

2- أهمية البحث وأهدافه

إن للتباين المكاني لخصائص الموقع تأثيراً جوهرياً على الاستجابة الزلزالية، لذلك فإن إهمال هذا التأثير في نماذج الهشاشة سيؤدي إلى تقديرات غير دقيقة للمخاطر الزلزالية مما قد ينعكس سلبًا على قرارات التصميم وإدارة الكوارث. يهدف هذا البحث إلى معالجة هذه الفجوة من خلال دمج تأثير صنف الموقع مباشرة في تطوير منحنيات الهشاشة للجسور، وذلك عن طريق إدخاله كمتغير وهمي (Dummy Variable) في نموذج الانحدار اللوجستي الثنائي (Binary logistic regression)، مما يسمح بتقييم كمي لتأثير الموقع على احتمالية الضرر، وعزل تأثيره الإحصائي المستقل وتحديد الفروقات في مستويات الضرر بين مختلف أصناف الموقع دون الحاجة إلى إيجاد توابع هشاشة خاصة بكل موقع على حدا.

3- مواد وطرائق البحث

تم في هذا البحث اعتماد منهجية تحليلية لإنشاء منحنيات الهشاشة الزلزالية للجسور مع الأخذ في الاعتبار تأثيرات الموقع والتربة، وذلك بالاعتماد على بيانات ضرر ناتجة عن إجراء تحليل ستاتيكي لاخطي لعدد كبير من الجسور تحت تأثير مجموعة واسعة من الشدات الزلزالية من أجل أربعة أصناف للموقع. تم إنشاء النموذج الاحتمالي للهشاشة باستخدام الانحدار اللوجستي الثنائي حيث تمت المعالجة من أجل كل حالة من حالات الضرر الزلزالي الأربع (خفيف، متوسط، شديد، تام)، فكان لكل حالة ضرر تابع احتمالي خاص فيها، وفي كل مرة كان المتغير التابع هو الوصول إلى حالة الضرر الزلزالي قيد الاهتمام، أما المتغيرات المستقلة التي سيعطى احتمال تحقق المتغير التابع بدلالتها هي:

1- الشدة الزلزالية: وهي تمثل متغير كمي يأخذ قيم متدرجة، وتم التعبير عنه باللوغاريتم الطبيعي للتسارع الطيفي عند الدور 1sec ((ln(S1)).

2- صنف الموقع: وهو متغير فئوي (أربع فئات تمثل أصناف الموقع المدروسة) وسيتم إدراجه في التابع كمتغير وهمي.

وجرت المعالجة الإحصائية بالاعتماد على برنامج SPSS.

قاعدة البيانات

بغياب بيانات حقلية حقيقية للضرر الزلزالي يتم اللجوء عادة إلى تحصيل هذه البيانات تحليلياً بالاعتماد على المحاكاة من خلال إنشاء نماذج حاسوبية للمنشآت وتحديد استجابتها عند سيناريوهات زلزالية مختلفة. عندما تكون الغاية هي وضع منحنيات هشاشة لصنف معين من المنشآت، يجب أن يتم إنشاء عدد كاف من النماذج الحاسوبية لتمثيل التباين الطبيعي في الخصائص المادية والهندسية الذي يمكن أن نصادفه في المنشآت الواقعية، وهذا ما يتطلب جهداً حسابياً كبيراً، لكنه بالمقابل يقود إلى نتائج أكثر موثوقية.

نركز في هذا البحث على منشآت الجسور البيتونية وتحديداً على صنف واحد وهو جسر بيتوني ذو أربع فتحات بسيطة الاستناد، بنيته العلوية عبارة عن جوائز بيتونية مسبقة الإجهاد، أما البنية السفلية فهي ركائز متعددة الأعمدة في كل منها ثلاثة أعمدة. استفدنا من قاعدة بيانات تضرر تم تحصيلها من تحليل حاسوبي لـ 149 عينة عشوائية لهذا النموذج من الجسور [13] بحيث عكست هذه العينات تنوعاً في الخصائص الهندسية وخصوصاً تلك التي تؤثر على الاستجابة الزلزالية للجسر كطول الجسر وعرضه وارتفاع الركائز ومواصفات الأعمدة من حيث مساحة المقطع ونسب التسليح الطولي والعرضي ومقاومة البيتون بالإضافة لمواصفات المساند التي تصل البنية العلوية للجسر ببنيته السفلية. تضمنت قاعدة البيانات هذه بيانات تضرر لأعمدة الجسر وأجهزة استناد جسم الجسر على الركائز والمحصلة بالاعتماد على التحليل الستاتيكي اللاخطي في الاتجاهين الطولي والعرضي للجسر من أجل 50 طيف استجابة متدرج الشدة الزلزالية باستخدام برنامج csibridge، وقد عرفت هذه الأطياف وفق AASHTO [14]، حيث تحسب معاملات التسارع لطيف الاستجابة التصميمي بالاعتماد على عوامل الموقع (حسب صنف التربة) منسوبة إلى التسارعات من أجل صخر من الصنف B، وتم التحليل من أجل أربعة أصناف للموقع (B, C, D, E) مواصفاتها مبينة في الجدول 2.

للوصول إلى قاعدة البيانات النهائية التي استخدمت في هذه الورقة البحثية اعتمدنا نظام العمل المشترك الذي يفترض أن الأحداث التي تمثل فشل أو تضرر مكونات الجسر ليست أحداث مستقلة احتمالياً وإنما هناك شيء من الترابط بينها. وفق هذا الافتراض يصل الجسر إلى مستوى معين من الضرر أو

الأذى الزلزالي بوصول أي من مكوناته إلى هذا المستوى، وعلى هذا الأساس قمنا بوضع قاعدة بيانات الضرر التي تمت معالجتها في هذه الورقة وتألفت من 119200 قيمة (عدد العينات الإنشائية x عدد الشدات الزلزالية x عدد أصناف الموقع المدروسة x عدد حالات الضرر).

الجدول (2) تعريف صنف الموقع [14]

صنف الموقع	صنف التربة
B	صخر، $762\ \text{m/sec} < \overline{v_s} < 1524\ \text{m/sec}$
C	تربة ذات كثافة عالية وصخر طري، $365m/\text{sec} < \overline{v_s} < 762\ \text{ft/sec}$ أو $\overline{N} > 50\ \text{blows/ft}$ و $\overline{s_u} > 100\ \text{kPa}$
D	تربة صلبة، $182\ \text{m/sec} < \overline{v_s} < 365\ \text{m/sec}$ أو $15\ \text{blows/ft} < \overline{N} < 50\ \text{blows/ft}$ أو $50\ \text{kPa} < \overline{s_u} < 100\ \text{kPa}$
E	قطاع تربة بـ $\overline{v_s} < 182\ \text{m/sec}$ أو $\overline{N} < 15\ \text{blows/ft}$ أو $\overline{s_u} < 50\ \text{kPa}$ أو أي قطاع بسماكة أكبر من 10m من الغضار الطري المعرف كتربة بـ $PI > 20$ ، $w > 40\%$ و $\overline{s_u} < 25\ \text{kPa}$
$\overline{v_s}$ متوسط سرعة أمواج القص من أجل أعلى 30.48m من قطاع التربة $\overline{N}$ متوسط ضربات تجربة الاختراق القياسية مقاسة بـ ضربة /قدم من أجل أعلى 30.48m من قطاع التربة $\overline{s_u}$ مقاومة القص غير الصرفة من أجل أعلى 30.48m من قطاع التربة *PI* مؤشر اللدونة *w* محتوى الرطوبة	

التحليل الإحصائي للبيانات:

بيانات الضرر التي حصلنا عليها هي بيانات ثنائية تأخذ إما القيمة 1 في حال وصل الجسر إلى حالة الضرر قيد الاهتمام أو القيمة 0 في حال لم يصل إليها، وكوننا نهدف بشكل رئيسي إلى تضمين صنف الموقع وهو متغير فئوي في تابع الهشاشة إضافة إلى الشدة الزلزالية، وجدنا أن الانحدار

اللوجستي الثنائي هو أسلوب إحصائي مناسب في مثل هذه الحالة، إذ يتميز بقدرته على التعامل مع المتغيرات الفئوية ودمجها في التابع من خلال استبدالها بمتغيرات وهمية. في سياق هذا البحث، وحيث أنه لدينا متغير فئوي هو صنف الموقع والذي تضمن أربعة فئات (B, C, D, E)، إذاً سيكون لدينا ثلاثة متغيرات وهمية، ومن المنطقي اختيار صنف الموقع ذي التربة الأكثر صلابة كفئة مرجعية لأنها تمثل الظروف الأكثر استقراراً. باختيار الصنف B كفئة مرجعية، نعرف المتغيرات الوهمية الثلاثة Site(1), Site(2), Site(3)كما يلي:

Site(1)=1 إذا كان صنف الموقع هو C، و0 خلاف ذلك.

Site(2)=1 إذا كان صنف الموقع هو D، و0 خلاف ذلك.

Site(3)=1 إذا كان صنف الموقع هو E، و0 خلاف ذلك.

فتصبح الصيغة العامة في الانحدار اللوجستي (مع وجود متغير كمي وحيد في هذا البحث) كما يلي:

$$logit(P) = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Site(1) + \beta_3 Site(2) + \beta_4 Site(3)$$

حيث:

P هو احتمال الوصول إلى حالة الضرر المعتبرة

X هو الشدة الزلزالية (المتغير المستقل الكمي).

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ معاملات النموذج، حيث يمثل المعامل β_0 التأثير الأساسي للفئة المرجعية، بينما تمثل$\beta_2, \beta_3, \beta_4$ التأثيرات الإضافية لكل من الفئات C, D, E على التوالي مقارنة بالفئة المرجعية B.

ويعطى الاحتمال من أجل كل حالة ضرر بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 ln(S1) + \beta_2 Site(1) + \beta_3 Site(2) + \beta_4 Site(3))}}$$

قمنا بإجراء تحليل الانحدار باستخدام برنامج SPSS وذلك من أجل كل حالة ضرر على حدا (تضمنت قاعدة بيانات كل حالة 28900 قيمة). يبين الجدول 3 توزيع الفئات (وهو نفسه من أجل كل حالات الضرر). نلحظ من الجدول أن الفئة B هي الفئة المرجعية (وفق اختيارنا) وتم إعطاء ترميز تلقائي من قبل البرنامج للمتغيرات الوهمية ((3) ,(2) ,(1)) التي تمثل الفئات (C, D, E) على الترتيب.

الجدول (3) ترميز المتغيرات الفئوية

		Frequency	Parameter coding		
			(1)	(2)	(3)
Site	B	7450	.000	.000	.000
	C	7450	1.000	.000	.000
	D	7450	.000	1.000	.000
	E	7450	.000	.000	1.000

4- النتائج والمناقشة

من تحليل الانحدار حصلنا على قيم المعاملات المطلوبة لكل حالة ضرر. يبين الجدول 4 أهم النتائج الخاصة بحالة الضرر الخفيف، حيث يعطي العمود B قيم المعاملات β للمتغيرات، تشير هذه الأرقام إلى مقدار التغير في لوغاريتم الاحتمال مع كل زيادة بمقدار وحدة واحدة للمتغير. من الملاحظ أن قيم β للمتغيرات الوهمية كلها موجبة وتزداد باتجاه الصنف E، وهذا يعني أن احتمال الضرر أقل في حالة صنف الموقع B ويزداد باتجاه الصنف E، وهذا يتماشى مع الفهم الهندسي بتضخيم الحركة الأرضية كلما كانت التربة أكثر رخاوة، الأمر الذي يؤدي إلى استجابة ديناميكية أكبر. يبين العمود Sig. الأهمية الموافقة للفرضية الصفرية ونلحظ أنها أقل من 0.001 (أقل بكثير من 0.05) لكل المتغيرات، مما يعني أن هذه المتغيرات (الشدة الزلزالية وصنف الموقع) ذات دلالة إحصائية عالية جداً، أي أنها عامل هام في تحديد احتمالية الضرر، أما العمود $Exp(B)=e^{\beta}$ فيمثل نسبة الأرجحية (odd ratio)، يسهل هذا العمود المقارنة بين الفئات، فمن أجل Site(1) مثلاً نلحظ أن Exp(B)=5.473 أي أن احتمال الضرر الخفيف يزداد بمقدار 5.473 مرة في حال كان الجسر مشيد في موقع من الصنف C عما إذا كان في موقع من الصنف B، وبشكل مشابه نجد أن هذا الاحتمال يزداد بمقدار 16.989 مرة من أجل الصنف D، و 58.243 مرة من أجل الصنف E، (وننوه هنا أن هذه الزيادة هي في الجزء من قيمة الاحتمال المتعلق بصنف الموقع وليس في قيمة الاحتمال النهائي إذ أن هناك جزء من قيمة الاحتمال ناتج عن تأثير الشدة الزلزالية). لا يختلف تفسير نتائج بقية الحالات وإنما القيم فقط. قيم β ونسبة الأرجحية لكل حالات الضرر مبينة في الجدول 5. أما الشكل 2 فيوضح التغيرات في نسبة الأرجحية لأصناف الموقع (نسبة للصنف B) من أجل مستويات الضرر المختلفة، حيث نلحظ

انخفاض هذه النسبة كلما اتجهنا نحو مستويات أعلى للضرر، فتقل الفروقات في احتمال الضرر بين أصناف المواقع المختلفة، ويعود ذلك إلى أن مستويات الضرر العالية تنتج عن شدات زلزالية كبيرة، مما يجعل الشدة الزلزالية في تابع الاحتمال هي المتغير المسيطر وبالتالي الأكثر تأثيراً في قيمة الاحتمال، ويرافق ذلك تراجع في تأثير المتغير الآخر (صنف الموقع)، وهذا يتفق مع انخفاض عوامل الموقع المستخدمة لإنشاء أطياف الاستجابة التصميمية كلما كانت الشدة الزلزالية أعلى [14].

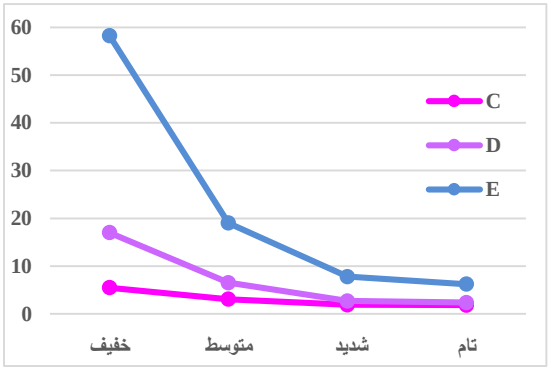
الجدول (4) نتائج تحليل الانحدار لحالة الضرر الخفيف

	B	Sig.	Exp(B)
ln(S1)	3.920	0.000	50.382
Site		0.000	
Site(1)	1.700	0.000	5.473
Site(2)	2.833	0.000	16.989
Site(3)	4.065	0.000	58.243
Constant	7.476	0.000	1765.940

الجدول (5) قيم معاملات نموذج الانحدار نسبة الأرجحية لحالات الضرر المختلفة

	خفيف		متوسط		شديد		تام	
	B	Exp(B)	B	Exp(B)	B	Exp(B)	B	Exp(B)
ln(S1) (β1)	3.920	50.382	2.868	17.596	2.104	8.198	1.772	5.882
Site								
Site(1) (β2)	1.700	5.473	1.124	3.078	0.645	1.906	0.610	1.840
Site(2) (β3)	2.833	16.989	1.877	6.531	0.988	2.685	0.865	2.375

Site(3) ($\beta 4$)	4.065	58.243	2.945	19.012	2.055	7.804	1.828	6.223
Constant (β_0)	7.476	1765.940	3.064	21.412	0.559	1.749	−0.153	0.858



الشكل (2) نسبة الأرجحية لأصناف الموقع بالنسبة للصنف B

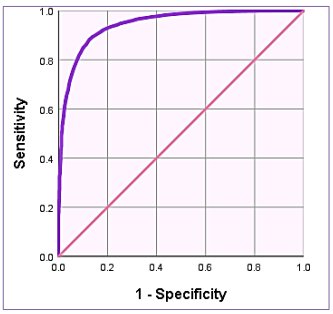
للتحقق من كفاءة النماذج التي توصلنا إليها ومقبولية تطبيقها سنعتمد الإجراءات التي سبق ذكرها. يبين الجدول 6 مصفوفات التشويش التي تعطي النسب التي تنبأ بها النموذج.

الجدول (6) مصفوفات التشويش

	Predicted		
	خفيف		Percentage Correct
	0	1	
0	1030	670	60.6
1	311	27789	98.9
Overall Percentage			96.7
	متوسط		

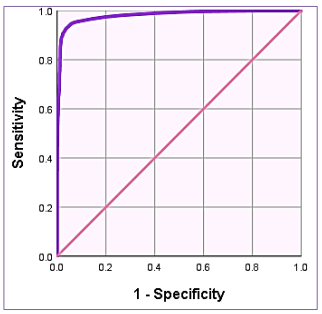
	0	1	Percentage Correct
0	3511	1730	67.0
1	810	23749	96.7
Overall Percentage			91.5
	شديد		Percentage Correct
	0	1	
0	8037	4600	63.6
1	1946	15217	88.7
Overall Percentage			78.0
	تام		Percentage Correct
	0	1	
0	11449	4512	71.7
1	3302	10537	76.1
Overall Percentage			73.8

نلحظ أن هذه النسب تراوحت بين 96.7% وهي نسبة ممتازة جداً حتى النسبة 73.8% وهي أكثر من جيدة. كما يبين الشكل 3 منحنيات ROC مع قيمة المساحة تحت المنحني AUR لكافة الحالات. بالاستناد إلى الجدول 1 نجد أن النماذج كلها مقبولة وهي متميزة من أجل حالتي الضرر الخفيف والمتوسط، وممتازة من أجل حالتي الضرر الشديد والتام، وهي متوافقة مع نتائج مصفوفة التشويش من حيث أن الجودة كانت أفضل في حالة الضرر الخفيف متناقصة باتجاه الضرر التام. من خلال هذه النتائج نجد أن النماذج التي توصلنا إليها مناسبة ويمكن اعتمادها لتوقع مستوى الأذى الزلزالي في مثل هذه الجسور.



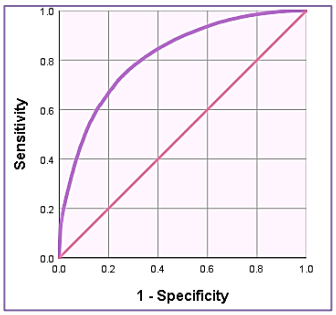
AUR=0.945

متوسط



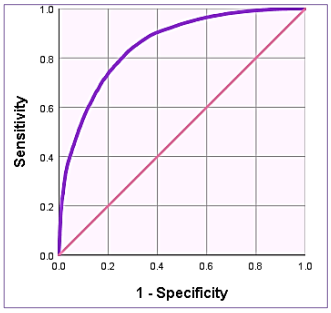
AUR=0.981

خفيف



AUR=0.815

تام

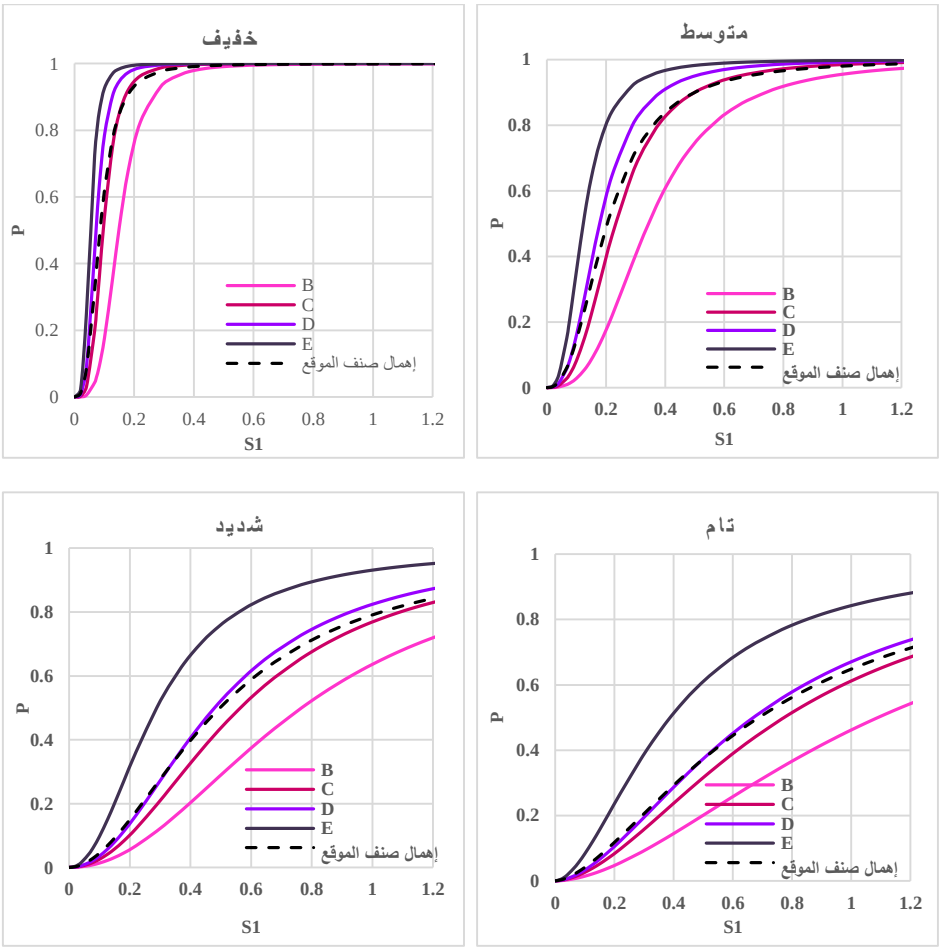


AUR=0.854

شديد

الشكل (3) منحنيات ROC لكافة حالات الضرر

بتعويض قيم المعاملات β االوافقة لكل حالة حصلنا على توابع الهشاشة المطلوبة، ومن خلال هذه التوابع رسمنا منحنيات الهشاشة الزلزالية التي أخذت بالاعتبار صنف تربة الموقع. بهدف المقارنة أوجدنا أيضاً توابع الهشاشة مع إهمال صنف الموقع، يبين الشكل 4 كل هذه المنحنيات حيث نلحظ أن إهمال صنف الموقع أعطى منحنيات وسطية، وهي وإن بدت مقبولة من أجل الصنفين C, D، لكنها تعطي نتائج مغلوطة فيما يخص الصنفين B, E، فعلى سبيل المثال إذا أخذنا حالة الضرر الشديد وعند القيمة S1=0.4، نحصل على احتمال أكبر بـ 95% من الاحتمال الحقيقي للصنف B وأقل بـ 40% من الاحتمال الحقيقي للصنف E، هذا وتختلف قيمة الفروقات من شدة زلزالية لأخرى لكنها تبقى بعيدة عن القيم الحقيقية.



الشكل (4) منحنيات الهشاشة مع وبدون أخذ تأثير الموقع

ولزيادة الموثوقية في توابع الهشاشة التي حصلنا عليها قمنا بإيجاد توابع الهشاشة لكل صنف موقع على حدا حيث أصبح المتغير الوحيد في التوابع هو الشدة الزلزالية

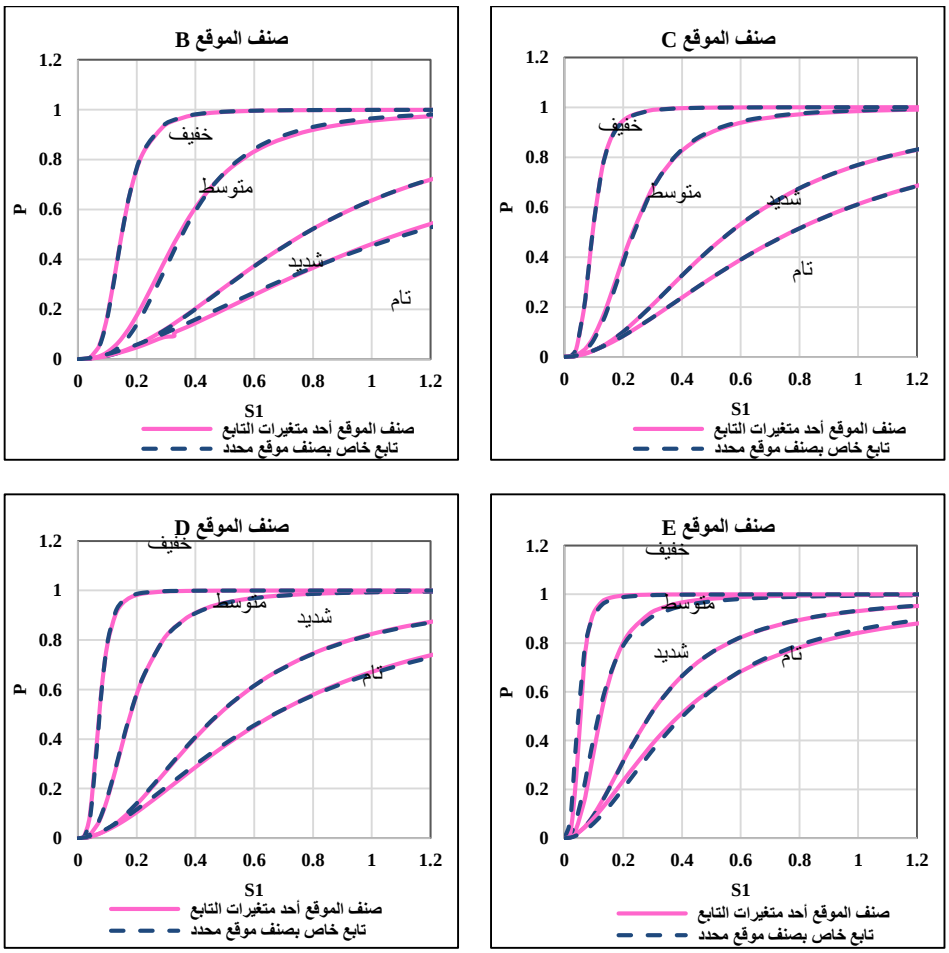
$$logit(P) = \beta_0 + \beta_1 X$$

تم تحليل الانحدار من أجل كل حالة ضرر وكل صنف موقع على حدا، وقيم المعاملات التي حصلنا عليها مبينة في الجدول 7. يوضح الشكل 5 منحنيات الهشاشة التي حصلنا عليها في الحالتين: حالة إدراج صنف الموقع في تابع الهشاشة، وحالة إيجاد توابع مخصصة لكل صنف على حدا. تبين هذه

المخططات التقارب الكبير لحد التطابق تقريباً بين الحالتين. يعكس هذا التقارب قدرة النموذج المقترح على إعطاء احتمال الضرر لمختلف أصناف الموقع بكفاءة عالية، أما فيما يخص القدرة التنبؤية للنماذج المخصصة فهي مبينة في الجدول 8، بالمقارنة مع النموذج المقترح نلحظ أن هذه النماذج لا تتفوق بشكل واضح على النموذج المقترح، بل على العكس تفوق هذا النموذج في معظم الحالات، وإذا ما أخذنا بعين الاعتبار الميزة التي يقدمها هذا النموذج في تخفيض التعقيد المرتبط باستخدام نماذج مختلفة نرى أنه يحقق توازن فعال بين الدقة والشمولية ضمن إطار واحد.

الجدول (7) معاملات الانحدار للنماذج المخصصة

	B	C	D	E
	ضرر خفيف			
β1	4.032	3.847	4.248	3.019
β0	7.678	9.014	11.107	9.32
	ضرر متوسط			
β1	3.19	3.024	2.82	2.398
β0	3.307	4.36	4.875	5.179
	ضرر شديد			
β1	2.123	2.108	2.071	2.117
β0	0.564	1.205	1.531	2.624
	ضرر تام			
β1	1.617	1.767	1.683	1.952
β0	−0.184	0.456	0.682	1.779



الشكل (5) منحنيات الهشاشة وفق تابع عام وتوابع مخصصة

الجدول (8) النسبة المئوية للقدرة التنبؤية للنماذج المخصصة والنموذج العام المقترح

		بسيط	متوسط	شديد	تام
النماذج الخاصة	B	95.8	87.6	73.5	72.5
	C	96.1	91.5	76.4	71.4
	D	96.6	92.8	78.5	72.5
	E	98.5	94	83.8	78.8
النموذج المقترح		96.7	91.5	78	73.8

5- الاستنتاجات والتوصيات

قمنا في هذا البحث بإيجاد منحنيات هشاشة تأخذ صنف الموقع مباشرة بالاعتبار من خلال استخدام المتغيرات الوهمية ضمن تحليل الانحدار اللوجستي الثنائي، وقد توصلنا نتيجة هذا البحث إلى أن

- المتغيرات الوهمية تمكننا من تحويل الخصائص النوعية إلى رؤى كمية قابلة للقياس، بحيث تسمح بمقارنات توضح الفروقات بين الفئات المختلفة بنسب رقمية وليس وصفية فقط
- إدراج المتغيرات الوهمية ساهم في تخفيض عدم اليقين في تقدير الهشاشة الزلزالية، وهذا من شأنه تحسين قرارات التقييم والتصميم.
- سمحت المنهجية المتبعة بالحصول على توابع هشاشة مخصصة ضمن نموذج إحصائي واحد، تقدم هذه التوابع بديلاً فعالاً عن التوابع المشتقة لكل صنف موقع لوحده، مما يسهم في تبسيط الإجراءات الحسابية مع الحفاظ على مستوى عالٍ من الدقة.
- توابع الهشاشة التي توصلنا إليها تقدم أداة مناسبة عند الحاجة لتقييم شبكة من الجسور المنتمية للصنف المدروس التي يمكن أن تكون موزعة على مواقع ذات تصنيفات زلزالية مختلفة.
- يمكن تطبيق هذه المنهجية على أنواع أخرى من المنشآت الهندسية، هذا ويمكن الاستفادة من مفهوم المتغيرات الوهمية واستخدامها في مسائل هندسية أخرى.

المراجع

[1] Karim, K. Yamazaki, F. 2003- A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges. **Earthquake Engng Struct. Dyn.** Vol.32, pp.1603-1626.

[2] Ioannou, I. Bertelli1, S. Chandler, R.E. Ohno, S. Shibayama, A. Suppasri, A. Rossetto, T. 2025- The 2011 Great East Japan earthquake: fragility of Japanese buildings to ground shaking. **Bulletin of Earthquake Engineering.** Vol. 23, PP.3173-3201.

[3] Gálvez, J. D'Ayala, D. Palazzi1, N. Carlos de la Llera, J. 2025- A new procedure to derive typological fragility functions for unreinforced masonry

structures: an application to a Chilean case. **Bulletin of Earthquake Engineering.** Vol. 23, PP. 4119–4157.

[4] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY 2003 **Multi–Hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model. (HAZUSmr4)**. Washington, D.C.

[5] Hair, J. F, Black, W. C. Babin, B. J. Anderson, R. E. 2019–**Multivariate Data Analysis**. 7th ed. Cengage Learning.

[6] Fox, J. 2015–**Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models**. 3th ed. SAGE Publications, Inc.

[7] Wooldridge, J. M. 2018– **Introductory Econometrics: A Modern Approach**. 7th ed. Cengage Learning.

[8] Hosmer, D. Lemeshow, S. Sturdivant, R. 2013– **Applied Logistic Regression**. 3th ed. Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[9] Hilbe, J. M. 2015– **Practical Guide to Logistic Regression**. Taylor & Francis Group, LLC.

[10] Field. A. 2009– **Discovering Statistics Using SPSS**. 3th ed. SAGE Publications.

[11] Erbani, J. Portier, P. Zsigmond,E. Nurbakova,D. 2024– Confusion Matrices: A Unified Theory, **IEEEAccess Journal**, vol. 12, pp. 181372 – 181419.

[12] Sathyanarayanan, S. Roopashri Tantri, B. 2024– Confusion Matrix–Based Performance Evaluation Metrics, **African Journal of Biomedical Research**, Vol. 27, pp. 4023–4031.

[13] Hussein, H. 2022- **Improving The Seismic Design of Some Types of Bridges Using the Probabilistic Damage Analysis**, Ph.D. dissertation, Department of Structural Engineering, the Faculty of Civil Engineering, Latakia university, Latakia, Syria.

[14] American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011- **AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design**. 2nd ed., Washington, DC.