

## Using the Ordinal Regression in the Probabilistic Analysis of Seismic Vulnerability for a Model of Concrete Bridges

Dr. Hanan Hussein\*

(Received 17 / 8 / 2023. Accepted 11 / 12 / 2023)

### □ ABSTRACT □

The increasing interest in seismic fragility curves and in developing them to be more effective and useful requires the use of statistical and probability techniques different from those used in the traditional case, so in this research we used an unfamiliar statistical method in this field, which is the ordinal regression. We adopted the analytical method to create seismic fragility curves for a class of concrete bridges, where a sufficient number of samples of bridges belonging to this class were analyzed using csibridge v20 software, and damage data were collected in each of them for different seismic intensities, then the damage data was processed based on five different models of ordinal regression then the corresponding fragility curves were plotted. The research showed that the ordinal regression with its five models used in this research is well suited to constructing seismic fragility curves for the studied class of bridges with some variation in the quality and fitness of the five models, but they are all acceptable.

**Keywords:** ordinal regression, probabilistic analysis, seismic fragility curves, bridges.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\* Work Supervisor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. hananhussein@gmail.com

## استخدام الانحدار الرتبي في التحليل الاحتمالي لقابلية التضرر الزلزالي لنموذج من الجسور البيتونية

د. حنان حسين\*

تاريخ الإيداع 2023 / 8 / 17. قُبِلَ للنشر في 2023 / 12 / 11

### □ ملخص □

إن الاهتمام المتزايد بمنحنيات التضرر الزلزالي وتطويرها لتصبح أكثر فاعلية وفائدة يتطلب استخدام تقنيات إحصائية واحتمالية مختلفة عن تلك المستخدمة في الحالة التقليدية، لذلك قمنا في هذا البحث باستخدام أسلوب إحصائي غير مألوف في هذا المجال وهو الانحدار الرتبي. اعتمدنا الطريقة التحليلية لإنشاء منحنيات التضرر الزلزالي لصف من الجسور البيتونية حيث تم تحليل عدد كاف من عينات الجسور المنتمية إلى هذا الصنف باستخدام برنامج csibridge v20 وتم تحصيل بيانات التضرر في كل منها من أجل شدات زلزالية مختلفة، ثم جرت معالجة بيانات التضرر بالاعتماد على خمسة نماذج مختلفة من الانحدار الرتبي ورسم منحنيات التضرر الموافقة. بين البحث أن الانحدار الرتبي بنماذجه الخمسة المستخدمة في هذا البحث مناسب على نحو جيد لإنشاء منحنيات التضرر الزلزالي لصف الجسور المدروس مع بعض التفاوت في جودة وملاءمة النماذج الخمسة إلا أنها جميعاً مقبولة.

الكلمات المفتاحية: الانحدار الرتبي، التحليل الاحتمالي، منحنيات التضرر الزلزالي، الجسور.



حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

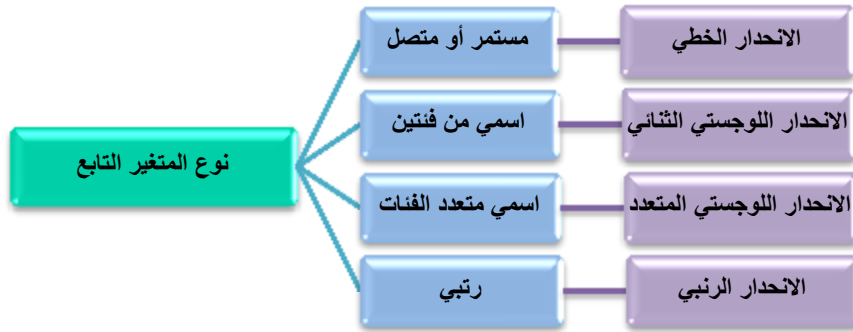
CC BY-NC-SA 04

\* مشرفة على الأعمال - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

hananhussein@gmail.com

## مقدمة:

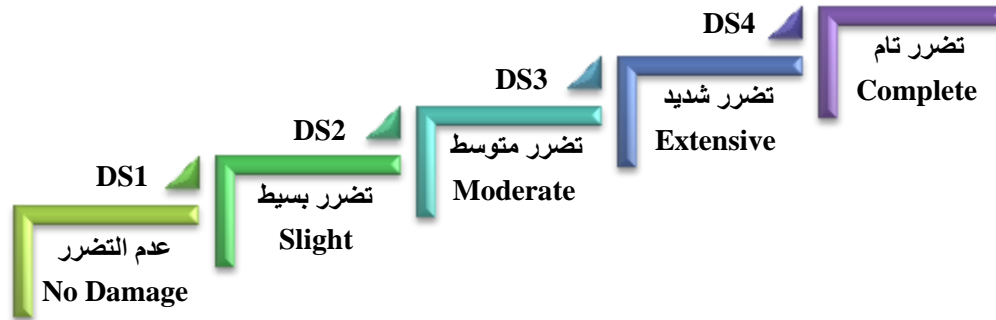
تهتم كل أنواع الانحدار المستخدمة في الدراسات سواء الاجتماعية أو الاقتصادية أو الطبية وحتى الهندسية بوصف العلاقة بين متغير تابع أو متغير استجابة وهو المتغير الذي نسعى للتنبؤ به وبين متغير أو أكثر من المتغيرات المستقلة (متغيرات التنبؤ). تختلف أنواع الانحدار المستخدمة باختلاف طبيعة الظاهرة المدروسة وبالتالي طبيعة البيانات التي نحصل عليها للمتغير التابع الذي نهدف إلى وصفه من خلال تابع رياضي إحصائي أو احتمالي. يبين الشكل (1) المستويات الأساسية لقياس المتغير وفق ما هو معتمد في البرامج الإحصائية ويبين أيضاً طريقة تحليل الانحدار الموافقة لكل مستوى. من المؤلف في الدراسات الهندسية استخدام الانحدار الخطي حيث في معظم التجارب الهندسية تكون البيانات رقمية مستمرة مثل إجراء تجارب لقياس مقاومة البيتون وربطها بعدد من العوامل على سبيل المثال، بينما يستخدم الانحدار اللوجستي في الحالات التي يكون فيها المتغير التابع فئويًا أي اسمياً Nominal، فالرقم هنا لا يعبر عن أي قيمة عددية ولا يشير إلى تقدير كمي، وإنما له معنى اسمي أي يحل محل الاسم. يمكن أن يأخذ المتغير التابع قيمتين أو فئتين ويدعى الانحدار اللوجستي الثنائي Binary Logistic Regression وهو الأكثر استخداماً، كما يمكن أن يكون له أكثر من قيمتين أو فئتين ويدعى الانحدار اللوجستي المتعدد لكن لا يوجد أي ترتيب أو أفضلية للفئات، أما في حال كانت البيانات فئوية لكنها ترتيبية أي أن للرقم معنى الرتبة فهنا نستخدم الانحدار الرتبي Ordinal Regression.



الشكل (1) نماذج الانحدار المناسبة لطبيعة بيانات المتغير التابع

يتمثل التقييم الاحتمالي لقابلية التضرر الزلزالي لمنشأ ما بشكل رئيسي بمنحنيات التضرر الزلزالي (Seismic Fragility Curves) التي تعبر عن احتمال أن يتجاوز الطلب الإنشائي الناتج عن مستويات مختلفة من الحركة الزلزالية قدرة المنشأ على مقاومة عتبة تضرر محددة [1]، تشكل عتبات التضرر الحدود الفاصلة بين حالات التضرر المختلفة التي تتدرج من التضرر البسيط وصولاً إلى التضرر التام أو الانهيار كما هو مبين في الشكل (2) حيث تمثل العتبة الخاصة بإحدى حالات التضرر، وحيث أن بيانات التضرر التي تستخدم للوصول إلى هذه المنحنيات هي بيانات غير مستمرة (تمثل فئات محددة) لكنها ترتيبية، فإذا عبرنا عن عدم التضرر بالرقم 0 وعن التضرر البسيط بـ 1 وهكذا وصولاً إلى 4 للتضرر التام، عندها إذا قلنا إن المنشأ وصل إلى حالة التضرر 3 فنحن نعلم إذاً أنه في مستوى تضرر أعلى من المستوى 1 أو 2 على سبيل المثال، بالتالي فإن هذا النوع من البيانات يوافق استخدام الانحدار الرتبي، هذا طبعاً لا يعني عدم إمكانية استخدام أساليب إحصائية أخرى فقد استخدم التوزيع اللوغاريتمي على نطاق واسع من أجل هذه الغاية، لكن مع زيادة الاهتمام بموضوع منحنيات التضرر وتطويرها لتكون قادرة على إعطاء معلومات أكثر تتجاوز ربط التضرر بالشدة الزلزالية فقط كان لابد من الانتقال إلى استخدام أساليب رياضية احتمالية

أخرى مثل الانحدار اللوجستي الثنائي أو المتعدد أو الانحدار الرتبى الذي تندرج ضمنه مجموعة من النماذج، تتميز هذه الأساليب بقدرتها على إدخال متغيرات متعددة يمكن أن تؤثر على احتمال التضرر كالمصنوعات الإنشائية على سبيل المثال، وفي حين يعالج التوزيع اللوغاريتمي شعاع برنولي الثنائي ويشاركه في هذا الانحدار اللوجستي الثنائي، فإن الأساليب الباقية قادرة على معالجة شعاع تأخذ عناصره أكثر من قيمتين وهذا يمكننا من إيجاد منحنيات حالات التضرر كافة بمعالجة شعاع واحد لبيانات التضرر.



الشكل (2) حالات وعتبات التضرر الزلزالي

### أهمية البحث وأهدافه:

يعد الانحدار الرتبى واحداً من أنواع الانحدار الواسعة الاستخدام في الدراسات الاجتماعية والاقتصادية لكنها غير مألوفة في الدراسات الهندسية، لذلك نهدف من خلال هذه الورقة البحثية إلى عرض عدة نماذج من الانحدار الرتبى واستخدامها في إيجاد منحنيات التضرر الزلزالي لنموذج من الجسور البيتونية، والتحقق من ملاءمتها لهذا الغرض.

### طرائق البحث ومواده:

يعتمد هذا البحث المنهجية التحليلية إذ تم في البداية إجراء تحليل إنشائي باستخدام برنامج csibridge v20 لعينات عشوائية تمثل نموذج الجسر المدروس من أجل الحصول على قاعدة بيانات التضرر اللازمة لرسم منحنيات التضرر الزلزالي، ثم تم إجراء تحليل إحصائي لهذه البيانات باستخدام عدة نماذج من الانحدار الرتبى وذلك بالاعتماد على برنامج SPSS التي تمكنا بنتيجتها من الوصول إلى المنحنيات الاحتمالية لقابلية التضرر الزلزالي.

### 1- الانحدار الرتبى Ordinal Regression

الانحدار الرتبى واحد من أنواع تحليل الانحدار التي تهدف إلى وصف العلاقة بين متغير تابع فئوي (المتنبأ به) ومجموعة من المتغيرات المستقلة (متغيرات التنبؤ) رقمية كانت أم فئوية من خلال تابع رياضي مناسب، مما يسمح بالنتبؤ بقيمة المتغير التابع عند أي مستوى للمتغيرات المستقلة  $X_i$ ، وهو يشبه الانحدار اللوجستي المتعدد في كون المتغير التابع في الحالتين فئوي، لكنه يختلف عنه في أن الانحدار اللوجستي المتعدد لا يهتم بترتيب الفئات في حين يوجد في الانحدار الرتبى نوع من أنواع الترتيب فتعكس الأرقام تدرجاً للفئات، لكن ليس من الضروري أن تكون الفروقات بين الدرجات متساوية.

بما المتغير التابع فئوي ترتيبى فإن المخرجات لن تكون قيماً محددة وإنما احتمالات تراكمية، أي من أجل كل تراكب معين للمتغيرات  $X_i$  سيعطي التحليل احتمال أن يكون المتغير في كل فئة من الفئات. يتم الربط بين الاستجابة التراكمية

والمتغيرات المستقلة من خلال تابع  $Y$  يدعى تابع ربط (link function) [2]. تعطى العلاقة بين تابع الربط ومتغيرات التنبؤ بالشكل العام الآتي:

$$Y = (\beta_{0j} + \beta_1 h_1(X_1) + \beta_2 h_2(X_2) + \dots + \beta_i h_i(X_i) + \dots + \beta_k h_k(X_k))$$

حيث  $h_i(X_i)$  تابع تفسير يناسب الحالة، فعلى سبيل المثال يمكن أن يكون  $h_i(X_i) = X_i$  أو  $h_i(X_i) = X_i^2$  أو  $h_i(X_i) = \ln(X_i)$  أو غير ذلك، وليس بالضرورة أن يكون لكل المتغيرات المستقلة نفس شكل التابع  $h$ . أما  $\beta_{0j}$  فهي العتبات الفاصلة بين الفئات حيث عدد الفئات هو  $k+1$  و  $\beta_i$  هي معاملات النموذج.

يمكن اختيار شكل تابع التفسير بناء على معرفة مسبقة بطبيعة العلاقة بين الاستجابة والمتغيرات، لكن في حال عدم وجود أي معرفة بطبيعة هذه العلاقة فيمكن اختيار شكل ما والتحقق من ملاءمته من خلال اختبارات محددة، أو اختيار عدة أشكال والتجريب لاختيار الأفضل، أما قيم  $\beta_{0j}, \beta_i$  فهي ما نحصل عليه نتيجة إجراء التحليل، وبناء على هذه القيم نقوم بحساب الاحتمالات التراكمية بالاعتماد على شكل العلاقة بين تابع الربط  $Y$  والاحتمال  $P$  التي تختلف باختلاف نموذج الانحدار الرتبى. توجد 5 نماذج أساسية لهذا الانحدار ولكل منها شكل تابع الربط الخاص وبالتالي تابع توزيع تراكمي مختلف، يبين الجدول (1) هذه النماذج [4], [3].

الجدول (1) أهم نماذج الانحدار الرتبى

نموذج الانحدار الرتبى	تابع الربط	تابع التوزيع التراكمي
Logit	$Y = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right)$	$\frac{1}{1+e^{-Y}}$
Probit	$Y = \Phi^{-1}(P)$	$\Phi(Y)$
complementary log-log(Copit)(Clog)	$Y = \ln(-\ln(1-P))$	$1 - e^{-e^Y}$
Negative log-log (-log)	$Y = -\ln(-\ln(P))$	$e^{-e^{-Y}}$
Cauchit	$Y = \tan(\pi(P - 0.5))$	$\frac{\arctan(Y)}{\pi} + 0.5$

يعطي كل نموذج انحدار قيماً مختلفة  $\beta_i, \beta_{0j}$ ، لكن في كل هذه النماذج يتم تقدير هذه المعلمات بالاعتماد على طريقة تقدير الإمكانية القصوى (Maximum Likelihood Estimation) حيث يتم تكرار العمليات الحسابية حتى الوصول إلى قيم معاملات النموذج التي تعطي أكبر قيمة لتابع الإمكانية القصوى، أي أكبر احتمال في أن يعطي النموذج توقعات موافقة للبيانات الفعلية، ولتسهيل التعامل مع هذا المؤشر يتم في الدراسات والبرمجيات الإحصائية استخدام لوغاريتم تقدير الاحتمال بدلاً من الاحتمال نفسه.

يتم الاعتماد على عدداً من الاختبارات الإحصائية من أجل التحقق من ملاءمة نماذج الانحدار الرتبى للحالة المدروسة ومن أجل المقارنة بين النماذج المختلفة ومن أهم هذه الاختبارات:

➤ **اختبار مربع كاي Chi-Square**: يبين هذا الاختبار إن كان النموذج مناسباً أم لا من خلال اختبار الفرضية الصفرية. تقوم الفرضية الصفرية على أن كل معاملات النموذج أصفار  $\beta_i=0$ ، وهذا يعني عدم وجود أثر للمتغيرات المستقلة على المتغير التابع، وتحقق هذه الفرضية يعني أن النموذج غير مناسب، أما عندما تكون القيمة

الاحتمالية معدومة تقريباً عندها نرفض الفرضية الصفرية ونقبل الفرضية البديلة، وبالتالي يكون النموذج معنوياً ومناسباً، وكلما كانت قيمة Chi-Square أكبر كان النموذج أفضل تحسب قيمة بالعلاقة:

$$\chi^2 = 2[LL(new) - LL(baseline)]$$

حيث:  $LL(new)$  هو لوغاريتم الاحتمال للنموذج مع المعاملات التي تم تقديرها  
 $LL(baseline)$  هو لوغاريتم الاحتمال للنموذج بدون إدخال المعاملات

اختبارات  $R^2_{CS}$  و  $R^2_{McF}$  و Nagelkerke R Square و Cox & Snell R Square

$R^2_N$  و  $R^2_{McF}$  McFadden R Square، وتعرف جميعها باختبارات مربع  $R$  الوهمية ( $Pseudo R-Square$ ) كونها تقابل  $R^2$  في الانحدار الخطي، تعبر هذه القيم عن التغير في التابع الذي يمكن تفسيره بواسطة المتغيرات المستقلة.

يحسب  $R^2_{CS}$  كما يلي:

$$R^2_{CS} = 1 - e^{\frac{2}{n}(LL(baseline) - LL(new))}$$

$n$ : حجم العينة

أما  $R^2_N$  فهو تعديل لمؤشر  $R^2_{CS}$  اقترح من قبل Nagelkerke كما يلي:

$$R^2_N = \frac{R^2_{CS}}{1 - e^{\frac{2(LL(baseline))}{n}}}$$

واقترح McFadden المؤشر الآتي:

$$R^2_{McF} = 1 - \frac{LL(new)}{LL(baseline)}$$

لا توجد قيم صريحة لهذه المؤشرات لتحديد ملائمة النموذج، لكن كلما كانت أكبر كان النموذج أفضل، ويعد مؤشر  $R^2_N$  الأكثر تفضيلاً بينها لمعظم تطبيقات الانحدار الرتبتي [6], [5].

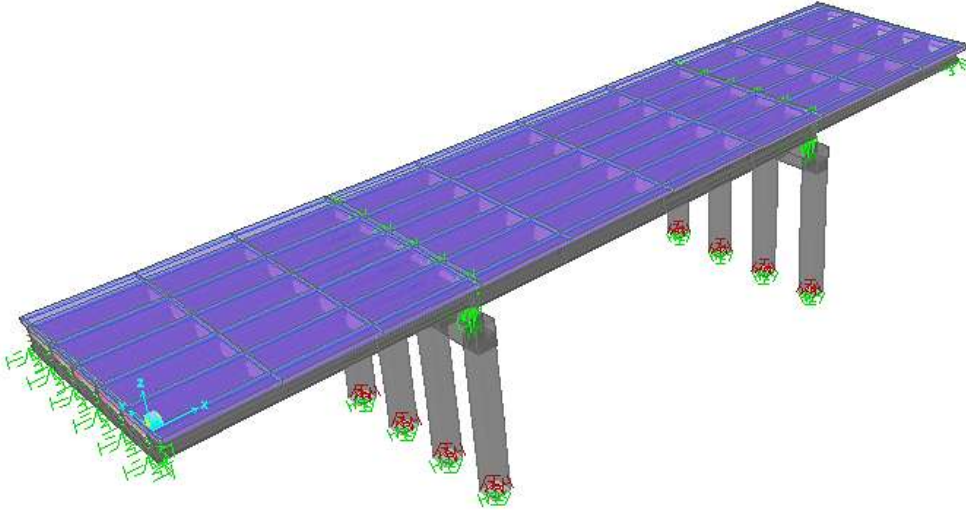
## 2- نموذج الدراسة والتحليل

اعتمدنا في هذا البحث الطريقة التحليلية لإيجاد منحنيات التضرر الزلزالي لنموذج من الجسور البيتونية ذات الجوائز مسبقة الإجهاد بسيطة الاستناد، يستند إنشاء منحنيات التضرر الزلزالي لصنف من المنشآت وفق هذه الطريقة إلى تحليل عدد كافٍ من النماذج الإنشائية الممثلة لهذا الصنف تحت تأثير شدات زلزالية مختلفة، لذلك قمنا بإنشاء عينات عشوائية من نموذج الجسر المدروس بالاعتماد على واحدة من طرائق تصميم التجربة وهي التصميم المركزي المركب والتي أفضت إلى 148 عينة إضافة للعينة المرجعية، يتم في كل عينة تغيير قيم عدد من الخصائص الإنشائية مثل طول الجسر وعرضه وارتفاع العمود ومساحة مقطعه ونسبة تسليحه الطولي والعرضي وبعض مواصفات أجهزة الاستناد مثل معامل القص ومعامل الاحتكاك لوسائد النيوبرين. يبين الجدول (2) أهم المواصفات للجسور المدروسة. تمت نمذجة كل هذه الجسور فراغياً باستخدام برنامج csibridge v20 وبيبين الشكل (3) أحد هذه النماذج، كما تم تعريف 50 طيف استجابة مختلف تتدرج فيها الشدة الزلزالية من قيم صغيرة جداً حتى قيم عالية بحيث تسمح برسم منحنيات التضرر من أجل مجال واسع من الشدات الزلزالية، وقد عرفت هذه الأطياف وفق AASHTO [7]. عرف الطلب الزلزالي من خلال مطاوعة الانتقال في أعمدة الركائز ومن خلال قيمة الانتقال في أجهزة الاستناد (الانتقال النسبي بين البنية العلوية للجسر والبنية السفلية)، وتم تحصيل بيانات الطلب الزلزالي عند كافة الشدات

الزلزالية المعرفة في كل عينات الجسور بالاعتماد على الإجراءات الستاتيكية اللاخطية، أما بيانات التضرر فقد تم الحصول عليها من خلال مقارنة قيم الطلب مع قيم عتبات التضرر الموافقة لحالات التضرر المختلفة لكل من أجهزة الاستناد والأعمدة، وبعتماد نظام السلسلة (وصول مكون في الجسر إلى حالة تضرر ما يعني وصول الجسر إلى هذه الحالة) تم إيجاد بيانات التضرر للجسر ككل، وبهذا تم تشكيل شعاع التضرر الذي ستم معالجته باستخدام نماذج الانحدار الأتفة الذكر.

الجدول (2) الخصائص الإنشائية للجسور المدروسة

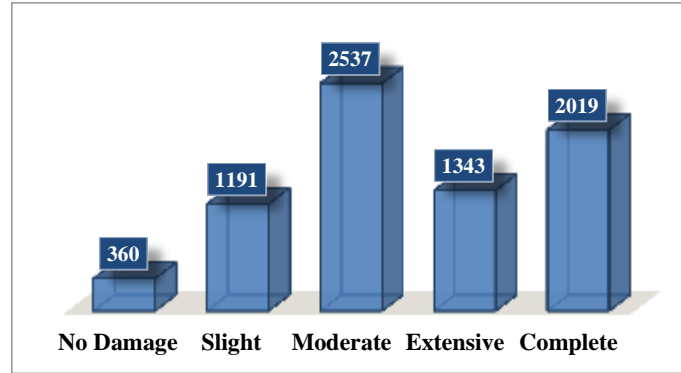
عدد المجازات	ثابت	3	مساحة مقطع الأعمدة $m^2$	متغيرة	0.49-1.69
طول الجسر m	متغير	45-65	نسبة التسليح الطولي للأعمدة	متغيرة	0.007-0.04
عرض الجسر m	متغير	10-15	نسبة التسليح العرضي للأعمدة	متغيرة	0.002-0.009
عدد الأعمدة في كل ركيزة وسطية	ثابت	4	سماكة البلاطة فوق الجوائز m	ثابتة	0.24
ارتفاع الركيزة الوسطية m	متغير	7-12	سماكة الديافرامات m	ثابتة	0.3
شكل مقطع الأعمدة	ثابت	مربع	الفجوة بين البلاطات المتجاورة m	ثابتة	0.1



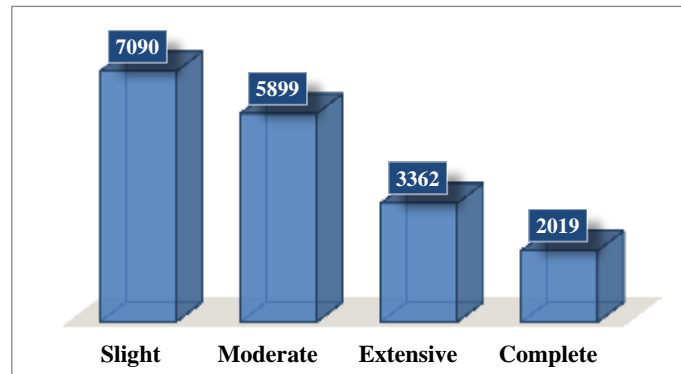
الشكل (3) شكل النموذج التحليلي للجسور المدروسة

### النتائج والمناقشة:

بعد إجراء التحليل تم تشكيل شعاع التضرر الذي تضمن 7450 عنصراً أخذت قيماً من 0 إلى 4 حسب حالة التضرر التي وصل إليها الجسر. كل عنصر من عناصر الشعاع يقابل قيماً للخصائص الإنشائية توافق عينة ما من العينات المدروسة ويوافق أيضاً شدة زلزالية محددة. يبين الشكل (4) توزيع بيانات التضرر على الفئات المختلفة فيما يبين الشكل (5) التوزيع التراكمي لهذه البيانات.



الشكل (4) توزيع البيانات على فئات التضرر



الشكل (5) التوزيع التراكمي للبيانات على فئات التضرر

جرت معالجة هذا الشعاع ضمن برنامج SPSS باستخدام النماذج المختلفة من الانحدار الرتبي مع اختيار نفس الشكل لعلاقة التابع  $Y$  بالمتغيرات المستقلة في كل النماذج كما يلي:

$$Y = (\beta_{0j} + \beta_i \ln(X_i))$$

تمثل  $X_i$  كل المعاملات الإثنائية التي تغيرت من عينة جسر لأخرى إضافة للشدة الزلزالية معبراً عنها بقيمة التسارع الطيفي عند الدور  $1s$ .

قبل قبول نتائج تحليل أي نموذج يجب التحقق من ملاءمة هذا النموذج بالاعتماد على الاختبارات الإحصائية التي تمت الإشارة إليها سابقاً. يبين الجدول (3) نتائج اختبار Chi-Square حيث نلاحظ أن الأهمية المعنوية للفرضية الصفرية معدومة (قيمة Sig.) أي أن النماذج المختارة مناسبة ووجود المتغيرات ساهم في تحسين قدرة النماذج على التنبؤ بالاحتمال، وبالمقارنة بين القيم الموافقة للنماذج نلاحظ أن أكبر قيمة لـ Chi-Square توافق النموذج Clog أي أنه الأفضل والأكثر ملائمة بين النماذج المدروسة يليه الـ Probit ثم الـ Logit ثم الـ Negative-log-log في حين أقل قيمة توافق النموذج Cauchit

الجدول (3) نتائج اختبار ملاءمة النماذج

	Log Likelihood	Chi-Square	Sig.
Logit	-5692.503	10503.584	0.000
Probit	-4854.490	12179.611	0.000
Clog	-56.090	21776.411	0.000
-log	-5745.132	10398.326	0.000
Cauchit	-6094.299	9699.993	0.000



يبين الجدول (4) نتائج اختبارات مربع  $R$  الوهمية، حيث نلاحظ أن النماذج جميعها جيدة وبالنظر إلى قيمة  $R^2_N$  (Nagelkerke) باعتبارها الأكثر موثوقية يمكن القول إن كل النماذج قادرة على تفسير أكثر من 75% من احتمالية التضرر بدلالة المتغيرات المدرجة. توافق القيم في الجدول (4) ما توصلنا إليه من نتائج الجدول (3) في أن النموذج الأفضل هو النموذج Clog ونفس الترتيب لباقي النماذج

الجدول (4) نتائج اختبارات مربع  $R$  الوهمية

	Cox and Snell	Nagelkerke	McFadden
Logit	0.756	0.798	0.480
Probit	0.805	0.850	0.556
Clog	0.946	0.999	0.995
-log	0.752	0.794	0.475
Cauchit	0.728	0.769	0.443

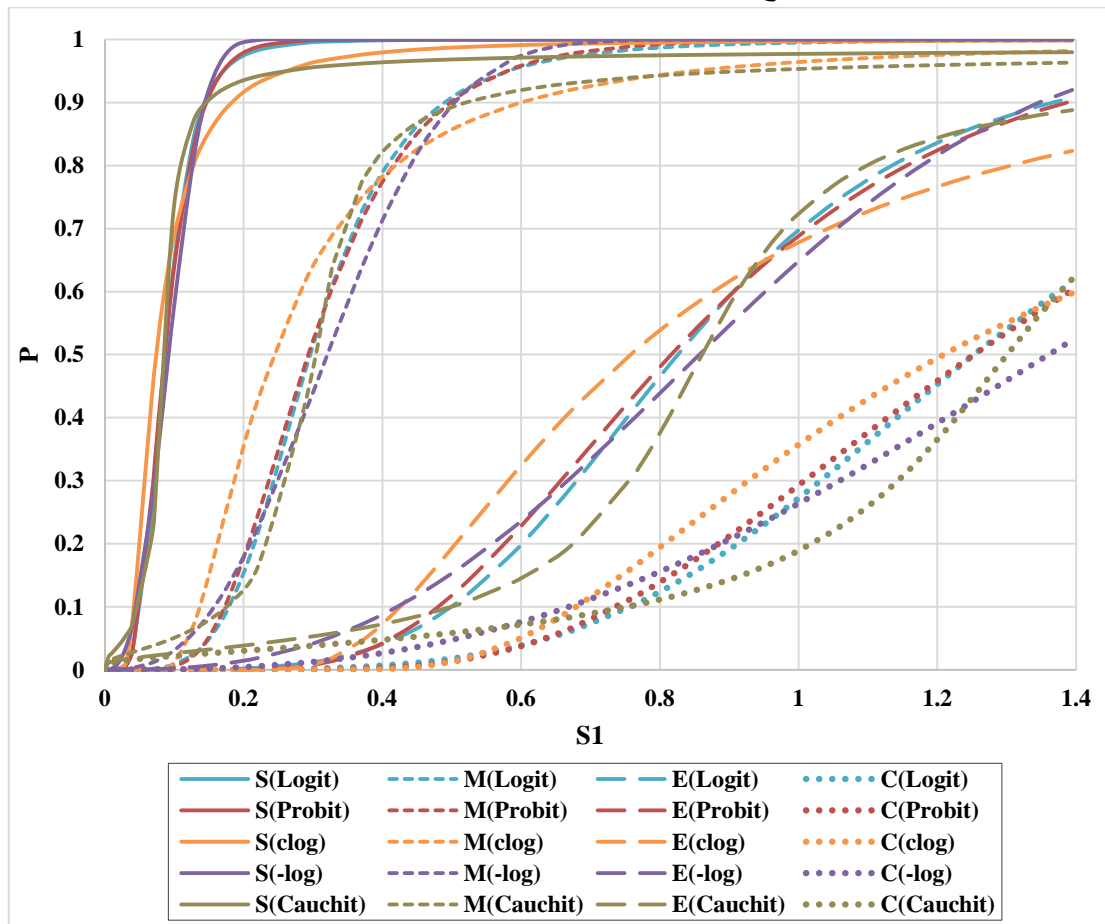
أما قيم  $\beta_i, \beta_{0j}$  التي أعطتها النماذج المختلفة فهي موضحة في الجدول (5)، بالاعتماد على هذه القيم يتم حساب احتمال الوصول إلى كل حالة من حالات التضرر ومن ثم رسم منحنيات التضرر، هذا ويمكن مباشرة بالنظر إلى قيم  $\beta_i$  أن نحدد اتجاه تأثير كل متغير على التضرر فإذا كانت القيمة موجبة هذا يعني أن زيادة قيمة المتغير الموافق تزيد من احتمال التضرر وبالعكس إذا كانت القيمة سالبة فإن زيادة قيمة المتغير الموافق تخفض من احتمال التضرر، وهنا نلاحظ أن كل النماذج أعطت نفس اتجاه التأثير للمتغيرات المختلفة.

الجدول (5) قيم  $\beta_i, \beta_{0j}$ 

		Logit	Probit	Clog	-log	Cauchit
$\beta_{01}$	تضرر بسيط	7.935	4.596	4.385	5.031	8.893
$\beta_{02}$	تضرر متوسط	13.282	7.557	6.862	8.347	16.064
$\beta_{03}$	تضرر شديد	17.767	10.035	9.232	10.957	21.985
$\beta_{04}$	تضرر تام	19.586	11.071	10.206	12.185	24.313
$\beta_1$	ارتفاع العمود	-1.381	-0.798	-0.689	-0.929	-1.660
$\beta_2$	مساحة مقطع العمود	-0.738	-0.398	-0.368	-0.420	-0.988
$\beta_3$	طول المجاز الوسطي	3.868	2.217	2.108	2.470	4.643
$\beta_4$	عرض الجسر	1.066	0.593	0.654	0.351	1.300
$\beta_5$	نسبة التسليح الطولي في العمود	-0.832	-0.469	-0.368	-0.585	-1.069
$\beta_6$	نسبة التسليح العرضي في العمود	-0.578	-0.318	-0.293	-0.375	-0.771
$\beta_7$	معامل القص للنيوبرين	-1.183	-0.684	-0.564	-0.834	-1.427
$\beta_8$	معامل الاحتكاك للنيوبرين	-0.707	-0.418	-0.466	-0.341	-0.713
$\beta_9$	الشدة الزلزالية بدلالة SI	4.367	2.420	2.084	2.655	5.647

بالاعتماد على النتائج السابقة قمنا برسم منحنيات التضرر الزلزالي لأحد الجسور الموافقة للصنف المدروس (جسر البلاطة الغربية)، يقع هذا الجسر بالقرب من مدينة طرطوس على طريق طرطوس - اللاذقية (جسر سفلي تحت الطريق السريع فوق الطريق القديم) بين جسر الشيخ سعد وجسر معمل الاسمنت. عرض الجسر 13m وطوله 45m

بمجاز وسطي بطول 24m وارتفاع الركيزة 9m، مساحة مقطع كل عمود في الركيزة  $1.21m^2$  ونسبة التسليح الطولي 0.0374 والعرضي 0.00685، يبين الشكل (6) منحنيات التضرر الموافقة لحالات التضرر المختلفة لهذا الجسر وفق النماذج الخمسة للانحدار الرتبتي، وقد رسمت هذه المنحنيات بدلالة التسارع الطيفي عند الدور (S1) تعطي هذه المنحنيات احتمال وصول الجسر إلى كل حالة من حالات التضرر عند أي قيمة لـ S1، ونلاحظ من هذا الشكل تقارب مقبول في شكل المنحنيات الناتجة عن النماذج المختلفة يسمح باعتماد أي منها خصوصاً أن نتائج الاختبارات الإحصائية كانت جيدة لكل هذه النماذج.



الشكل (6) منحنيات التضرر الزلزالي لجسر ينتمي للصف المدروس (جسر البلاطة الغريبة في طرطوس)

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث استخدام الانحدار الرتبتي لإيجاد منحنيات التضرر الزلزالي لنموذج من الجسور البيتونية، حيث يناسب هذا النوع من تحليل الانحدار طبيعة بيانات التحليل الاحتمالي للضرر الزلزالي كونها بيانات فئوية ترتيبية. تم استخدام النماذج الخمسة الأساسية لهذا الانحدار وجرى المقارنة بينها بالاعتماد على عدد من الاختبارات الإحصائية وقد بينت نتائج البحث:

- إمكانية استخدام أي من النماذج الخمسة الأساسية للانحدار الرتبتي على نحو موثوق في إيجاد منحنيات التضرر الزلزالي لنموذج الجسور المدروسة مع أفضلية لنموذج (Clog) complementary log-log.

- بما أن الانحدار الرتبي يسمح بإدخال أي متغيرات يمكن أن تؤثر على التضرر، فيمكن مباشرة من نتائج التحليل معرفة اتجاه تأثير كل متغير، وهذا مفيد جداً في حال استخدام منحنيات التضرر أثناء عملية التصميم حيث يمكن أن نغير في قيمة المتغيرات بالاتجاه الذي يخفض احتمال التضرر وذلك ضمن حدود ما تسمح به اشتراطات التصميم.
- يمكن الاستفادة من قيم  $\beta_i, \beta_{0j}$  التي توصلنا إليها في رسم منحنيات التضرر لأي جسر ينتمي إلى الصنف المدروس بعد إدخال بياناته الموافقة (قيم المتغيرات التي تم اعتمادها في هذا البحث) في تابع الربط وإجراء الحسابات الاحتمالية المناسبة لكل نموذج من نماذج الانحدار الرتبي.
- نوصي باستخدام الانحدار الرتبي لإيجاد منحنيات التضرر الزلزالي لنماذج أخرى من الجسور ولمنشآت هندسية الأخرى كالمباني.

### References:

- 1- Ramanathan, K., *Next Generation Seismic Fragility Curves for California Bridges Incorporating the Evolution in Seismic Design Philosophy*.USA. Georgia Institute of Technology, 2012.
- 2- SMITH, T.; WALKER, D.; MCKENNA, C., *An Exploration of Link Functions Used in Ordinal Regression*, Journal of Modern Applied Statistical Methods, 18 (1), 2019.
- 3- HUA, C.; CHOI, Y.; SHI, Q., *Advanced regression methods*, University of Alabama, 2021.
- 4- CHRISTENSEN, R.; *Cumulative Link Models for Ordinal Regression with the R Package*, Journal of Statistical Software (<https://www.jstatsoft.org/>), 2021.
- 5- TABACHNICK, T.; FIDELL, L., *using multivariate statistics*, Pearson Education, New Jersey, United States, 2007.
- 6- VEALL, R.; ZIMMERMANN, H., *A Comparison of Pseudo R-squared Measures in Ordinal Logistic Regression*, Journal of Computational Statistics & Data Analysis, 23 (1), 1996.
- 7- American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*, 2nd Edition, Washington DC, 2011.

