اختبار نموذج وصلة خارجية من الخرسانة المسلحة لجائز مع عمود تحت تأثير أحمال دورية[١]

هالة توفيق حسن[٢] أحمد سليمان الحسن[٣]

محمد أحمد نعيم عبد المعطى[٤]

الملخص

تتركز الإجهادات العظمى، ولاسيما إجهادات عزوم الانحناء في الجوائز والأعمدة الناتجة عن أحمال الزلازل، في مناطق الوصلات مما يجعلها أكثر مناطق الإطار الخرساني خطورة، وأي خلل في سلوك الوصلات ينعكس مباشرة على سلوك الإطار بالكامل. من هذا المنطلق، ومع تعدد صعوبات تحديد سلوك البناء خلال الزلازل، فقد تمت معالجة الوصلات بطريقة عكسية، إذ تم تحديد نقاط ضعف معينة في الهيكل، تتركز فيها النشاطات غير المرنة عند تعرض البناء إلى تشوهات كبيرة مما يسمح لباقي عناصر الهيكل الإطاري بالمحافظة على سلوكها المرن. جرى تبني مبدأ العمود القوي والجائز الضعيف (Strong Column–Weak Beam Principle)، والذي يكون من خلاله نسبة مجموع العزوم المقاومة للأعمدة في أي وصلة إلى مجموع العزوم المقاومة للجوائز في الوصلة ذاتها أكبر من عامل أمان محدد بـ (١.٢) وفق الكود السوري[١]. ومن ثم إذا تعرض بناء إلى انتقال غير مرن تتشكل المفاصل اللدنة في جوائز إطاراته وتبقى الأعمدة ضمن حد المرونة (الخضوع).

[١] أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالبة هالة توفيق حسن بإشراف الأستاذ الدكتور أحمد سليمان الحسن و الأستاذ الدكتور محمد أحمد نعيم عبد المعطي.

[٢] قسم الإنشاءات- كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق.

[٣] أستاذ- قسم الإنشاءات - كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق.

[٤] أستاذ- قسم الإنشاءات - كلية الهندسة- جامعة القاهرة.

تم تصميم نموذج لعينة وصلة خارجية جائز-عمود من مبنى إطاري من الخرسانة المسلحة متعدد الطوابق مطاوع مقاوم للعزوم من الخرسانة المسلحة بمقياس $Scale = \frac{1}{2}$، وفق اشتراطات الكود السوري في تصميم وتحقيق المباني و المنشآت المقاومة للزلازل[1]، لاختبار السلوك اللاخطي على آلة الشد العام تحت تأثير أحمال دورية محاكية للزلازل بهدف:

١- دراسة الوصلة تحت تأثير أحمال دورية حتى يتشكل المفصل اللدن (plastic hinge)، في الجائز وليس في العمود، ذو مطاوعة عالية يقبل دورانات كبيرة في المقطع العرضي لهذا المفصل، تمتص بها الطاقة المتولدة خلال الزلازل دون أن تفقد مقداراً كبيراً من مقاومتها أو صلابتها، والتي تمثل آلية الانهيار.

٢- إيجاد منحني بين العزم والانحناء (Moment-Curvature). بمنحني متبق (Hysteresis Curve) يبين الطاقة المبددة، والتي تبين إمكانية استعمال الضرر الإنشائي (التشققات وتشكل المفصل اللدن) كميكانيزم لتبديد الطاقة الزلزالية.

تم عرض تفصيلات ووصف لخواص المواد المستعملة في تصنيع، واختبار خمس عينات J1، J2، J3 ، J4، J5 والتي تم تثبيتها على هيكل معدني تم تصميمه ببرنامج (V10 SAP2000)، وتنفيذه من أجل رفع العينة عن الأرض، وليصبح الطرف الحر للجائز في الوصلة مثبتاً بين فكي الجهاز. تم اختبار خمس عينات لوصلة خارجية من الخرسانة المسلحة لجائز- عمود على آلة الشد، بتطبيق برنامج تحميل العينة على جهاز الكمبيوتر المرتبط بها، وهي عبارة عن أحمال متناوبة موجبة وسالبة، تبين أن خلية التحميل (Cell Loading) لا تتحسس للقوى من الأعلى، وهذا ما استدعى تطبيق انتقالات دورية متزايدة على الطرف الحر للوصلة والمثبت بالفك العلوي للآلة تبتدئ من $5mm$، حتى $50mm$ كتمثيل للقوى الزلزالية المؤثرة، وقياس وتحصيل المعلومات اللازمة لمعرفة سلوك هذه العينات في المجال الخطي، واللا خطي لحالة التحميل المدروسة.

كلمات مفتاحية: مفصل لدن، وصلة خارجية جائز- عمود من الخرسانة المسلحة، أحمال الزلازل، سلوك لا خطي، التشققات والضرر الإنشائي.

١- مقدمة Introduction

عدم توافر إمكانية الحصول على السلوك اللاخطي لنموذج نظري لوصلة من الخرسانة المسلحة، والذي يمثل نموذج الضرر الإنشائي، لتقدير التشققات فيه تحت تأثير أحمال مكررة (Cyclic Loads)، من أجل دراسة أثر هذه التشققات في تخفيض استجابة المنشأة، وتبديد الطاقة الداخلة للمنشأة مع كمية مقبولة من الضرر الإنشائي والمسموح به استثمارياً، كان لا بد من اختبار الوصلة تحت تأثير أحمال محاكية للزلازل، وتحليل ذات النموذج ببرنامج (ANSYS) ومقارنة النتائج مع النتائج المخبرية، ومعايرة النموذج التحليلي ليصار إلى اعتماده في دراسة المتغيرات الأخرى دون الرجوع إلى المخبر، ولذلك تم تصميم نموذج لعينة وصلة خارجية جائز-عمود من مبنى إطاري من الخرسانة المسلحة متعدد الطوابق مطاوع مقاوم للعزوم من الخرسانة المسلحة بمقياس $Scale=\frac{1}{2}$، وفق اشتراطات الكود السوري في تصميم وتحقيق المباني والمنشآت المقاومة للزلازل[1]، لاختبار السلوك اللا خطي على جهاز الشد تحت تأثير أحمال دورية محاكية للزلازل.

وقد تم عرض تفصيلات ووصف لخواص المواد المستعملة والمختبرة في مخبر خواص المواد في مركز البحوث العلمية في حلب، في تصنيع واختبار عينات الوصلة المثبتة على هيكل معدني، تم تصميمه وتنفيذه من أجل رفع العينة عن الأرض، وليصبح الطرف الحر للجائز في الوصلة مثبتاً بين فكي الجهاز.

تم إجراء الاختبار في معهد البحوث العلمية في حلب، وذلك لخمس عينات لوصلة خارجية من الخرسانة المسلحة لجائز- عمود على آلة الشد، بتطبيق منحنى تحميل للعينة على جهاز الكمبيوتر المرتبط بها، وهي عبارة عن أحمال متناوبة موجبة وسالبة، تبين أن خلية التحميل (Loading Cell) لا تتحسس للقوى من الأعلى، وهذا ما استدعى تطبيق انتقالات دورية متزايدة على الطرف الحر للوصلة والمثبت بالفك العلوي للآلة تبتدئ من $5mm$، حتى $50mm$ كتمثيل للقوى الزلزالية المؤثرة، وقياس

وتحصيل المعلومات اللازمة لمعرفة سلوك هذه العينات في المجالين الخطـي، واللا خطي لحالة التحميل المدروسة.

تم إجراء اختبار وفق مرحلتين، حيث تتضمن المرحلة الأولى اختبارا لثلاث عينات J1 إلىJ3، في حين تضمنت المرحلة الثانية اختباراً للعينتين J4، J5.

٢. هدف البحث

نتيجة عدم توافرإمكانية الحصول على السلوك اللاخطي لنموذج نظري لوصلة من الخرسانة المسلحة، والذي يمثل نموذج الضرر الإنشائي، لتقدير التشققات فيه تحت تأثير أحمال مكررة (Cyclic Loads)، من أجل دراسة أثر هذه التشققات في تخفيض استجابة المنشأة، وتبديد الطاقة الداخلة للمنشأة مع كمية مقبولة من الضرر الإنشائي والمسموح به استثمارياً، كان لا بد من اختبار الوصلة تحت تأثير أحمال محاكية للزلازل بهدف:

- دراسة الوصلة تحت تأثير أحمال دورية حتى يتشكل المفصل اللدن(plastic hinge)، في الجائز وليس في العمود، ذو مطاوعة عالية يقبل دورانات كبيرة في المقطع العرضي لهذا المفصل، تمتص بها الطاقة المتولدة خلال الزلازل دون أن تفقد مقداراً كبيراً من مقاومتها أو صلابتها، والتي تمثل آلية الانهيار.
- إيجاد منحنى العزم والتقوس (Moment-Curvature)، بمنحنى متبق بين الطاقة المبددة، والتي تبين إمكانية استعمال الضرر الإنشائي (التشققات وتشكل المفاصل اللدنة) كميكانيزم لتبديد الطاقة الزلزالية.

٣. دراسة مرجعية Literature Survey

لما كانت الوصلات والعقد تشكل المناطق الحرجة في الإطارات البيتونية المخصصة لمقاومة أحمال الزلازل، دعا الباحثون من الستينيات إلى وضع تصميم منطقي لها يعتمد على مبدأين مرجع [2]:

• ينتج انهيار معظم الإطارات البيتونية عن انهيار الأعمدة أو الجوائز في منطقة الوصلات، وللتحكم بهذا الانهيار يجب إلزام حصوله في الجوائز حصراً، بحيث تتشكل فيها مفاصل لدنة ذات مطاوعة عالية، تقبل دورانات كبيرة في المقطع العرضي لهذا المفصل، تمتص بها الطاقة المتولدة خلال الزلازل دون أن تفقد مقداراً كبيراً من مقاومتها أو صلابتها.

• منح العقدة ميزة المحافظة على مقاومتها، فتؤمن ترابطاً سليماً بين الجائز والعمود، وتقوم بمهامها خلال الزلزال بشكل مقبول[٢]. من هذه المنطلقات تمكن الباحثون من تأمين تفاصيل لمنطقة الوصلات، تكسبها مطاوعة عالية وتعطيها قدرة على امتصاص طاقة الزلازل.

قام باحثون من لجنة الكود(ACI- 352)[3]، تحت مظلة المعهد الأمريكي للخرسانة (American Concrete Institute) بإجراء سلسلة من البحوث الحقلية والمخبرية دامت ثلاثين عاماً تقريباً، توصلت من خلالها إلى فهم كامل لسلوك الوصلات والعقد، واستناداً إلى ذلك أعطيت التفاصيل الإنشائية اللازمة لتفادي انهيارها، وقد انسجمت تعليمات الملحق رقم/٢/ للكود السوري الخاص في تصميم وتحقيق المباني والمنشآت المقاومة للزلازل مرجع[1] بدراسات لجنة الكود (ACI- 352)، والدراسات المرجعية عن هذا الموضوع.

قدم Andrew Whittaker [10] في ١٩٩٦، بحثاً عرض فيه معلومات مهمة عن تحليل وتصميم المباني الإطارية المقاومة للعزوم ولوصلة جائز-عمود، والتحليل باعتبار الجاذبية والحمل الجانبي معاً.

وقدم أيضاً بعض الملاحظات على تصميم وصلة جائز-عمود، وطور عدداً من النماذج لنقل القوة في وصلة الجائز-عمود، والنموذجان الأكثر أهمية هما:

• نموذج (truss model): يفترض وجود رابط مثالي في الوصلة وبأن القوى تنقل إلى الوصلة عن طريق حديد التسليح الطولي.

• نموذج عنصر ضغط قطري (diagonal strut model): لا يفترض وجود أي رابط مثالي في الوصلة، القوة مطبقة كقوة ضغط في الخرسانة على الجانب المعاكس من الوصل.

درس Kazuhiro وآخرون [6]، في عام 1987، معايير التصميم لمقاومة الزلازل لوصلة داخلية جائز- عمود من الخرسانة المسلحة، تأخذ في الحسبان التشوهات الحدية المتوقّعة لنموذج وصلة داخلية لجائز- عمود لمبنى من الخرسانة المسلحة، على الرغم من أن انهيار القص في وصلة جائز- عمود مرتبط مع التغير في آلية نقل القص، وسببه انهيارأساور قضبان التسليح في الجوائز ضمن الوصلات. كما ناقش موضوع التصميم المقاوم للزلازل في المستوي لوصلة داخلية من منشأة إطارية من الخرسانة المسلحة لجائز ضعيف مع عمود قوي Interior Beam-Column (Connections in a Weak-Beam Strong-Column)، وعدم انهياره في أثناء الزلزال التصميمي، للأسباب الآتية:

أ- يجب أن يتم تحميل حمل الجاذبية على الوصلة.

ب- توقّع المطاوعة الكبيرة وتبديد الطاقة في الوصلة غير ممكن.

ت- صعوبة إصلاح الوصلة بعد الزلازل.

ووفق ورقة العمل السابقة يمكن تحمل القليل من الضرر شريطة بقاء المنشأة مترابطة ومستقرة في أثناء الزلزال، ولكن لا يسمح بحدوث انهيار في المنشأة يمكن أن تنجم عنه خسائر في الأرواح. إن تصميم وصلة لتحمل قوى الجاذبية وعزم الانحناء (Flexure) يعد محققاً إذا كان تسليح العمود مستمراً خلال الوصلة، و يجب أن تصمم الوصلة ضد انهيار القص الهش، على الرغم من أن بعض تشققات القص ممكن قبولها، وفي الوقت ذاته، يلزم إرساء قضبان تسليح الجائز (وجودها بشكل صحيح) لتطوير آلية مقاومة الزلازل في الجائز الضعيف مع العمود القوي.

٣- خواص المواد المستعملة Material Properties

٣-١ الخرسانة Concrete

أُجريت الاختبارات الميكانيكية لمكعبات الخرسانة في مخبر اختبار المواد، حيث تم إجراء كسر على الضغط لثلاث عينات مأخوذة من العينات الخرسانية السابقة J1 إلى J3 بأبعاد (7x7x7cm)، وأيضاً تم كسر ثلاثة مكعبات خرسانية خاصة بالعينتين J4 وJ5 بأبعاد (10x10x10cm)، وتعيين المقاومة المكعبية على الضغط للخرسانة f_{cub}، والانفعال ε (Strain) الموافق له، والمقاومة المكعبية أخذت عند ٢٨ يوماً.

لتعيين المقاومة المتوسطة للخرسانة في الشد f_t (Tensile Strength of Concrete)، للعينات ذاتها حسب علاقة الكود السوري الآتية ($f_{ct} = 0.44\sqrt{f_c'}$)، حيث f_c' هي المقاومة الاسطوانية المميزة للخرسانة المعتمدة في الدراسة التحليلية، والتي تم حسابها وفق شرطي الكود السوري [1]، وتعيين معامل يونغ للخرسانة E_C (Young's Modulus of the Concrete)، كما هو موضح في الجدول (١)، وتم استعمال عامل بواسون للخرسانة $\nu = 0.2$، والوزن الحجمي للخرسانة $\gamma = 25 kN/m^3$.

الجدول (١): الخواص الميكانيكية للخرسانة.

رقم العينة	رمز العينة	المقاومة الاسطوانية للخرسانة في الضغط عند ٢٨ يوما	المقاومة الاسطوانية للخرسانة في الشد	المقاومة المكعبية للخرسانة	الانفعال	عامل مرونة الخرسانة
Specimen Number	Symbol	Compressive Strength of Concrete	Tensile Strength of Concrete	Cubic Strength of Concrete	Strain	Young's Modulus of Concrete
		f_c'	$f_t = 0.44\sqrt{f_c'}$	f_{cub}	$\varepsilon_C = \frac{\Delta L}{L}$	E_c
		N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	-	N/mm^2
١	J1	13	١.٧٩	١٦	٠.٠٢٢	27073.8
٢	J2	14	1.86	17.68	٠.٠٢١	28153.2
٣	J3	12	١.٧٣	15.3	٠.٠٤٣	26059.9
٤	J4	32.2	2.84	41.25	0.015	42961.9
٥	J5	29	٢.٥٩	37.75	0.023	39098.4

٢-٣ فولاذ التسليح Reinforcing Steel

تحدد الخواص الميكانيكية لفولاذ التسليح بإجهاد الخضوع f_y ، وهو الإجهاد المطابق لمرحلة الخضوع كما في الفولاذ الطري العادي المقاومة، والعالي المقاومة، أو إجهاد الضمان $f_{0.2}$ (إجهاد الخضوع الاصطلاحي)، الذي يترك (0.2%) من الانفعالات الدائمة كما في بعض الأنواع من الفولاذ العالي المقاومة والذي لا تظهر فيه عتبة خضوع، ومقاومة الشد القصوى f_{su} ، والنسبة المئوية للاستطالة عند الانقطاع على طول أصلي من العينة قبل الاختبار، مقداره خمسة أمثال قطرها.

تم استعمال الأقطار الآتية لقضبان التسليح $\phi 6mm$ ، $\phi 14mm$. واستعمال عامل بواسون لفولاذ التسليح هو $\nu = 0.3$ ، والوزن الحجمي للفولاذ $\gamma = 77kN/m^3$.

تم اختبار عينات فولاذ التسليح للأقطار المذكورة والمستعملة في تسليح عينة وصلة خارجية من الخرسانة المسلحة لجائز – عمود، كما هو مبين في الجدول (٢).

جدول (٢): الخواص الميكانيكية لفولاذ التسليح.

عامل مرونة الفولاذ		الانفعال		الإجهاد الأعظمي	إجهاد الخضوع	المساحة	قطر العينة
Young's Modulus of Steel		**Strain**		**Ultimate Stress**	**Yield Stress**	**Actual Area**	**Diameter**
$E_{su}=\frac{f_{su}}{\varepsilon_u}$	$E_{sy}=\frac{f_y}{\varepsilon_y}$	ε_y	ε_u	f_{su}	f_y	A	ϕ
N/mm^2	N/mm^2			N/mm^2	N/mm^2	mm^2	mm
1277	**200000**	**0.023**	**0.33**	**٤٢٣**	**295**	**28.27**	**6**
2058	**210000**	**0.023**	**0.٢٦**	**٦٧٩**	**٤٩٦**	**١٥٣.٨٦**	**١٤**

٤- الاختبارات Tests

٤-١ العينات المختبرة Test Specimens

اخْتُيِرتْ ست عينات لوصلة جائز- عمود خارجية من الخرسانة المسلحة، اعتمدت خمس تجارب، ولكن استبعدت السادسة لأن العينة انهارت بشكل غير نظامي، والسبب أنه بعد تجهيز العينة وتطبيق برنامج تحميل العينة على جهاز الكمبيوتر المرتبط بآلة الشد، وهي عبارة عن أحمال متناوبة موجبة وسالبة، تبين أن خلية التحميل (Cell Loading) لا تتحسس للقوى من الأعلى، وهذا ما استدعى تطبيق انتقالات على طرف العينة الحر بعد تثبيتها بالفك العلوي للآلة.

صمم نموذج لعينة وصلة جائز-عمود خارجية من الخرسانة المسلحة بمقياس $Scale = \frac{1}{2}$، وفق اشتراطات الكود السوري في تصميم وتحقيق المباني والمنشآت لمقاومة الزلازل، لاختبار السلوك اللاخطي على آلة الشد العام تحت تأثير أحمال دورية محاكية للزلازل مع مراعاة:

١. تحقيق مفهوم العمود القوي والجائز الضعيف (Strong column and weak beam)، بإجبار حدوث و تشكل المفصل اللدن (plastic hinge)، في الجائز وليس في العمود، والتي تمثل آلية الانهيار.

٢. إيجاد منحنى العلاقة بين العزم والانحناء Moment-Curvature.

إن مفهوم المفصل اللدن يزودنا بطريقة مفيدة لتحديد الأحمال التي تستطيع جملة إنشائية مكونة من مواد تملك خواصاً مرنة – لدنة تحملها، وذلك بافتراض أن المفصل اللدن يسمح بالدوران كالمفصل العادي، بعد أن يكون قد تحمل كامل طاقته (Capacity)، والمحددة بالعزم M_p.

نصادف الانحناء اللدن عند دراسة العناصر الإنشائية المكونة من مواد لا تتبع قانون هوك، أو عند دراسة العناصر المحملة حتى ما بعد مجال مرونتها الخطية، ولو كانت في بدء التحميل تتبع لقانون هوك، وهذه هي حالة معظم العناصر وتعتمد بشكل

أساسي على مخطط الإجهاد – الانفعال للمادة المستعملة. يمكن زيادة الأحمـال علـى الجملة الإنشائية حتى نحصل على تشكل عدد كاف مـن المفاصـل اللدنـة لإزالـة الاستقرار، وعندها نكون قد وصلنا إلى الحمولة القصوى للجملة، ما دامـت قـادرة على تحمل المزيد من الأحمال بحسب درجة ارتباطاتها الزائـدة، وبحسـب مواقـع المقاطع التي تشكلت فيها المفاصل اللدنة. ويصل المقطـع العرضـي للجـائز عنـد خضوعه لعزم انحناء يعادل العزم اللدن M_{p} إلى المرحلة الأخيـرة، ويتشـكل فيـه المفصل اللدن نظراً لإمكانية دوران القسم اليميني بالنسبة للقسم اليساري دون زيـادة الإجهادات في المفصل اللدن[4].

لو درسنا الآن التشوهات و لمقطع عرضي مستطيل الشكل للجائز الظفري الذي يمثل الوصلة، والناتجة عن تزايد قيم العزم M في الوثاقة عند وجه العمود بسـبب القـيم المتزايدة للانتقالات المطبقة على الطرف الحر للجائز، وذلك حتى يبلغ العـزم اللـدن M_{p}، والذي يعد العزم الأقصى الممكن أن يتحمله المقطع العرضي، حيـث تـزداد التشوهات وتحافظ على توزيعها الخطي في المقطع بموجب المعادلة الآتية:

$$\varepsilon = \varphi . y \qquad (١)$$

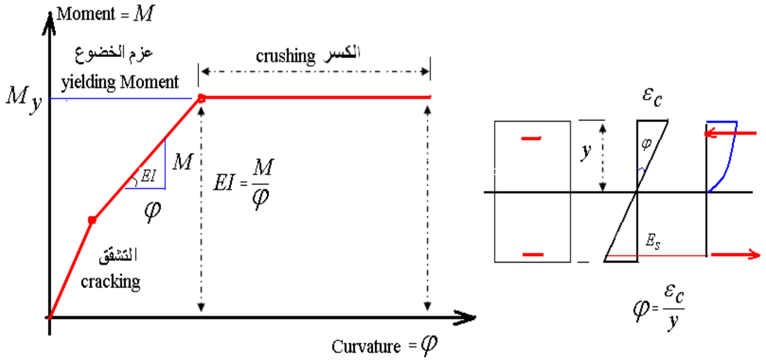
وهذه المعادلة صحيحة من أجل مختلف قيم M المتزايدة، وذلك لأن فرضـية بقـاء المقاطع مستوية تبقى صحيحة دوماً، وفق الشكل (٥)، حيث:

φ: التقوس أو الانحناء (Curvature)، ويعطى وفق مخطط العزم – الانحناء كما هو مبين في الشكل(١)، بالعلاقة الآتية:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_C}{y} \qquad (٢)$$

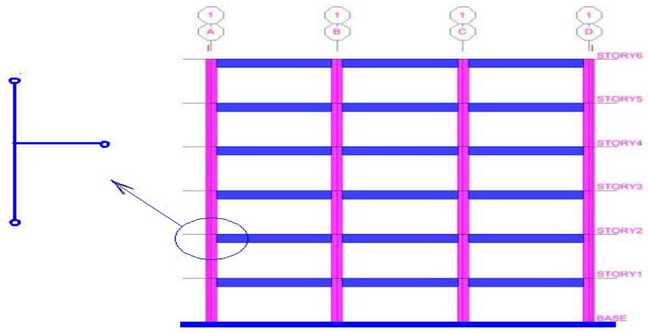
حيث: y :المسافة بين المحور السليم والليف العلوي المضغوط، ε_C: الانفعـال فـي الخرسانة.

M_y : عزم الخضوع (Yielding moment). EI : قساوة المقطع.



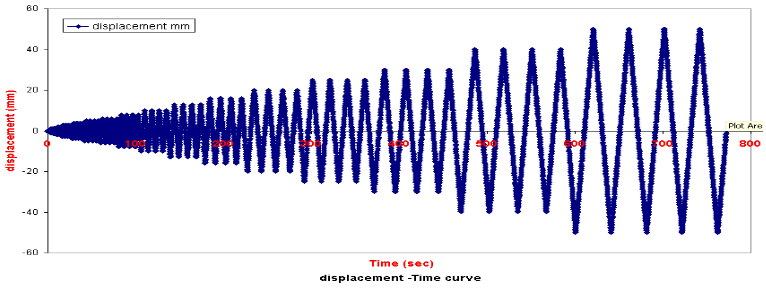
الشكل (١): مخطط العزم – الانحناء (Moment-Curvature Diagram).[5]

تمثل العينات المدروسة في الاختبار وصلة جائز– عمود خارجية من مبنى إطاري متعدد الطوابق، ومقاوم للعزوم كما في الشكل (٢)، والذي سيتم تحليله لاخطياً لاحقاً ببرنامج (SAP2000 V10)، بعد إدخال العناصر اللاخطية (Nlink) التي تعتمد في نمذجة المخمدات الفيسكوإيلاستيك الصلبة، والسلوك المتبقي للمفصل اللدن المتمثل بمنحنى العزم- الانحناء Moment-Curvature، المتشكل في الجائز، والذي نعده خواصاً للمفصل اللدن، ودراسة البارامترات المطلوبة في البحث.



الشكل (٢): موقع العينة المختبرة في الإطار المقاوم للعزوم.

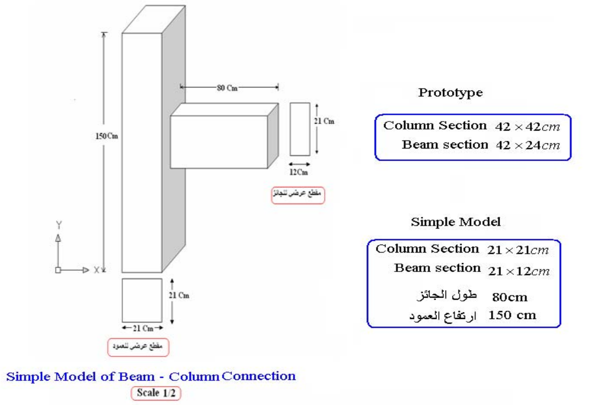
اختبرت العينات على آلة الشد العام تحت تأثير تحميل دوري (cyclic load history) لكل عينة على حدة، ضمن المجال ($5mm$ to $50mm$)، ويمثل كمنحنى سجل زمني بين الانتقالات الدورية المطبقة على الطرف الحر للعينة كما هو مبين في الشكل (٣).



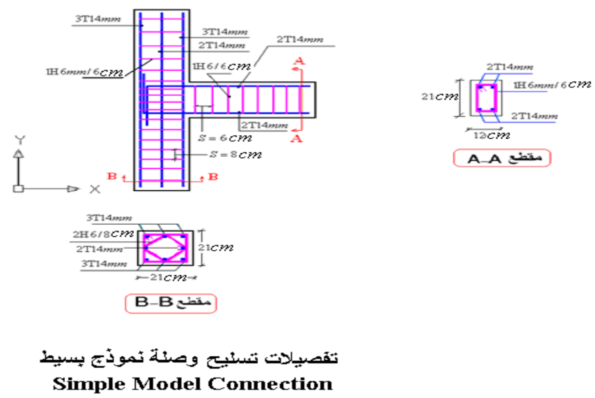
الشكل (٣): منحنى التحميل الدوري (الانتقال – الزمن) المطبق على الطرف الحر لجائز الوصلة.

٤-٢- شكل العينة وأبعادها Specimen Dimensions and Configurations

كل العينات لها الأبعاد ذاتهـا، العمـود ذو مقطـع مربـع (21x21cm)، وارتفاعـه (150cm)، في حين الجائز مقطعه مستطيل ارتفاعـه (21cm)، وعرضـه (12cm)، وطول الجائز الظفري (80cm) بدءاً من وجه العمود. في حين مكان التحميـل كـان على بعد ($70Cm$)، وذلك من وجه العمود. تم تركيب قالب العمود أولاً بعد وضـع فولاذ التسليح، ثم صبه بمقطع عرضي 21x21cm، ومن ثم تركيـب قالـب الجـائز الظفري ذي المقطع 21x12cm مع تسليحه ثم صبه، كما هو مبين فـي الشـكل (٤)، والشكل (٥).



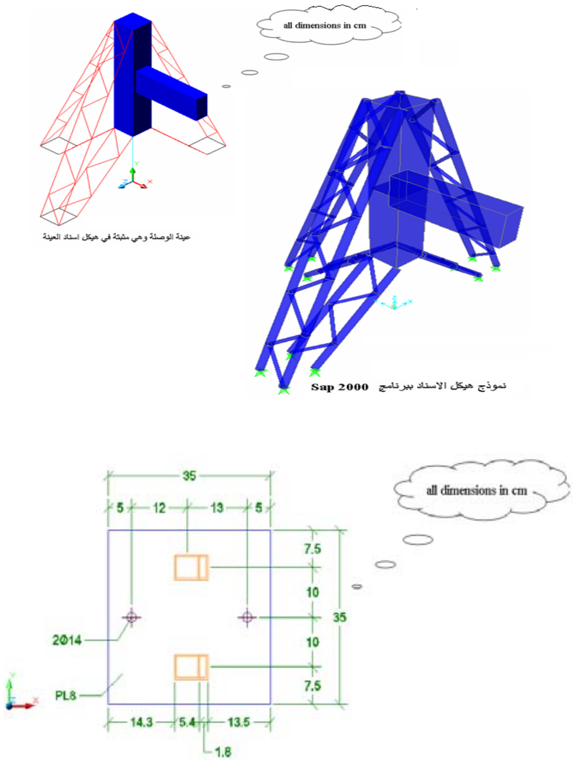
الشكل (٤): التفصيلات التنفيذية للوصلة، من أبعاد مقاطع العمود، والجائز وشكل التسليح.



الشكل (٥) : تفصيلات تنفيذية لنموذج عينة الوصلة الخارجية من الخرسانة المسلحة لجائز – عمود.

يمثل الشكل (٦) نموذج هيكل الإسناد لعينة الوصلة الخارجية من الخرسانة المسلحة لجائز– عمود الذي تم تصميمه وفق برنامج SAP2000، من أجل الوصول إلى الأبعاد اللازمة للصفائح الذي تم تصنيعه بتجميعها، بحيث يتحمل الأحمال المتزايدة المطبقة

على الطرف الحر لجائز العينة، دون انقلاب أو تشوه أو انهيار لحامل العينة في أثناء الاختبار، وذلك كي يصبح الطرف الحر للعينة في مستوي الفك العلوي لجهاز الشد.



الشكل (٦): نموذج هيكل الإسناد عينة الوصلة، وأبعاد قاعدة استناد الهيكل على أرضية المخبر.

٤-٣- طريقة تثبيت العينة

١. تثبيت هيكل الإسناد المعدني على المجاري بواسطة براغي فولاذية ($M18mm$)، أمام جهاز الشد بحيث يكون طول ذراع الاختبار المطلوب مساوياً للمسافة بين نقطة تطبيق الحمل والوثاقة الخرسانية عند وجه (العمود)، ويكون قرابة ($70cm$).

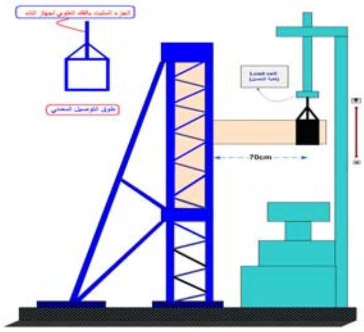
٢. تثبت عينة الاختبار الخرسانية ضمن هيكل الإسناد المعدني بوضع الجزء العمودي منها (العمود) في مكانه المخصص ضمن الهيكل، وقمطه جيـداً بواسـطة صـفائح وبراغي ($M12mm$)، ليصبح الجائز المراد اختباره أفقياً تمامـاً، ونهايتـه الحـرة متوضعه بين فكي جهاز الشد.

٣. ربط الجائز الخرساني مع الفك العلوي للجهاز بواسطة طوق التوصـيل المعـدني كما في الشكل (٧)، على بعد $70cm$ من الوثاقة (طول ذراع الاختبار لتأمين الحركة الترددية اللازمة).

٤. بعد تنفيذ الخطوات السابقة تكون العينة الخرسانية جاهزة للاختبار.

٤-٤- إجراءات الاختبار Testing Procedure

تم تثبيت العينة من أجل تحضيرها للاختبار وذلك بتثبيت طرفي العمود فـي هيكـل التثبيت المعدني والمثبت جيداً في أرضية المخبر، بينما الطرف الحر للجـائز (The Free End of The Beam)، تم تثبيته بالفك العلوي لجهاز الشد كما هو موضح فـي الشكل (٧).

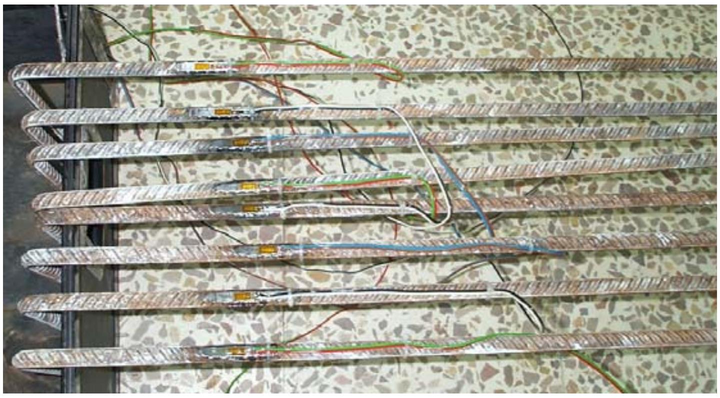


الشكل (٧): نموذج العينة جاهزة للاختبار.

٤-٥- قياس النتائج وتحصيلها:

ثُبِّتَتْ أجهزة قياس الانفعال الالكترونية (Electrical Strain Gauges)، علـى سـطح العينة على بعد (5cm) من وجه العمود، عند مستوي حديد التسليح العلوي، والسـفلي للجائز، للعينات J1 إلىJ3 ، وعلى فولاذ التسليح العلوي، والسفلي للجائز وعلى بعـد (5cm) من وجه العمود للعينات J4, J5 ، وذلك لقياس الانفعال عند وجه العمود فـي

المنطقة المحتمل تشكل المفصل اللدن عندها، وتسجيل قراءات هذه الحساسات في كل مرحلة من مراحل الاختبار، كما هو مبين في الشكل (٨).



الشكل (٨): مقاييس انفعال مثبتة على فولاذ التسليح العلوي والسفلي.

٤-٦- مراحل الاختبار

بسبب تثبيت الجائز الظفري الأفقي من الخرسانة المسلحة مع الفك العلوي لجهاز الشد، وخلية التحميل (Load cell) مثبتة في الفك السفلي للجهاز (الفك الثابت)، فقد اعتمد في الاختبارات المنفذة على الشوط (الانتقال)، وتم تطبيق انتقالات دورية متزايدة على الطرف الحر للوصلة بدءاً من $5mm$، حتى $50mm$ كتمثيل للقوى الزلزالية المؤثرة. كانت جميع الاختبارات المطبقة على العينات وفق متغيرين فقط هما الانتقال ($\Delta : mm$)، والزمن ($t : \sec$)، بينما المتغيرات المطلوبة التقوس، والعزم لتعيين منحنى الاستجابة المتبقية moment-rotation، نحصل عليها بالاستعانة بالمتغيرين السابقين وبقوانين الانحناء اللدن، وقوانين المادة.

تم اختبار كل عينة سبع عشرة مرحلة اختبار ترددي، تزداد كل مرحلة عن سابقتها بمقدار الانتقال (الشوط)، وتتضمن كل مرحلة أيضاً ثمانية أشواط متتالية (أربعة أشواط ضغط سالبة، وأربعة أشواط شد موجبة)، وسجل الزمن الكلي لكل مرحلة،

وبالوقت ذاته كانت مقاييس الانفعال موصولة بجهاز كمبيوتر لتحصـيل المعلومـات الخاصة بقيم الانفعالات المقابلة للانتقالات.

٥- عرض نتائج الاختبارات Presentation of Test Results

٥-١- منحنـى الاسـتجابة المتبقـي للعـزم- الـدوران Moment–Curvature Hysteresis Response

يشكل الانتقال المطبق (The Applied Displacement) على النهاية الحـرة للجـائز الظفري للوصلة (The Free Ends of The Cantilever Beam)، ثلاث مركبات مـن التشوهات تصنف كالآتي [9]:

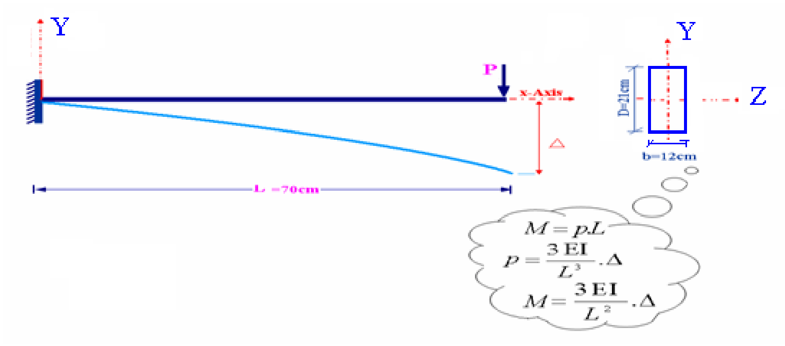
١.تشوهات القص في الوصلة (Shear Deformation in The Connection).

٢.تشوهات الانحناء في المفصل اللدن (Flexural Deformation in Plastic Hinge).

٣. تشوهات الانحناء لامتداد فولاذ التسليح داخل الوصلة، وهي تشوهات تدرس فـي حالة تصميم الوصلة لمقاومة الزلازل، وهي خارج نطاق هذا البحث.
(Flexural in Reinforcement Extension Within The Anchorage zone Deformation).

تشوهات التقوس هي واحدة من القياسات التي تشير إلى العوامل التصميمية للوصـلة، وستدرس عن طريق منحنى الاستجابة العـزم -التقـوس (Moment–Curvature). يمكن قياس تقوس الجائز في منطقة المفصل اللدن كدوران نسبي بين مقطعين للجـائز يبعدان عن بعضهما بمقدار طول مقياس الانفعال (Strain Gauges) $L_p = 18mm$.

يدرس في هذا البحث الجائز الظفري ذو المقطع المستطيل بمقياس $Scale = \frac{1}{2}$، الـذي يمثل نموذج الوصلة الخارجية لجائز- عمود من الخرسانة المسلحة، كما هو مبين في الشكل (٩). عرض مقطع الجائز $B = 12cm$، وارتفاع المقطع $D = 21cm$، طول الجائز L، حيث يخضع الطرف الحر لقوة القص الشاقولية P، ومن ثم عزم الانحناء في الطرف الموثوق به للجائز الظفري يساوي ($M = P.L$)، ومن الضروري تعيين قيمة العزم M_p عند حدوث اللدونة الكاملة وتشكل المفصل اللدن عند وجه العمود.

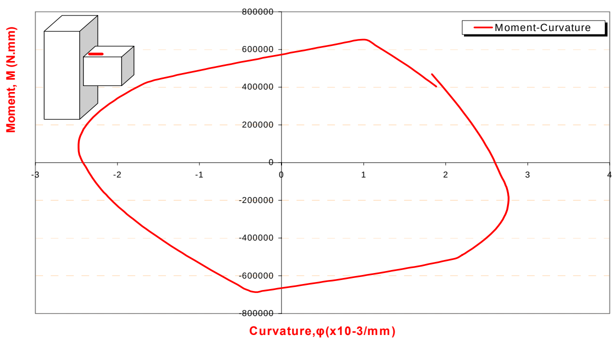


الشكل (٩): تفصيلات الجائز الظفري ذو المقطع المستطيل.

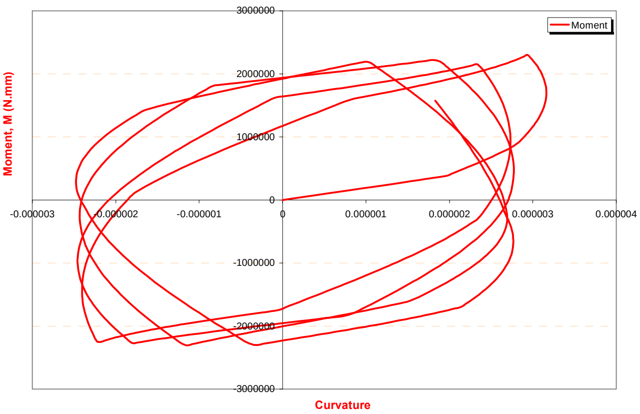
نذكر أن قراءة الحساسات الالكترونية التي نحصـل عليهـا مـن جهـاز تحصـيل المعلومات، تعطى بـ (microstrain)، ومن ثَم القيمة المستعملة في الدراسة (مقـدرة بالمليمتر) مساوية إلى $\frac{Value(mecrostrain)}{10^6}$، والخطأ ثابت وغير متزايد ويمكن طرحه من البداية، وتصبح القراءات بعدها صحيحة، بغية الحصول على منحنى الاسـتجابة المتبقية للعزم –التقوس (Moment –Curvature Hysteresis Response).

توضع قيم العزم الناتجة مقابل قيم التقوس عند كل حالة تحميل لكـل عينـة، ضـمن المجال $\Delta = 0.5mm \rightarrow 50mm$. تم عرِضتْ منحنيات الاستجابة المتبقية للعـزم – التقوس، للعينات (J4) و (J5)، كما هو مبين في الأشكال من (١٠)، وحتى (١٤).

ولوحظ أن التشوهات اللدنة الكبيـرة (The Large Plastic Deformations)، فـي منطقة المفصل اللدن (The Plastic Hinge) قد حصلت عند وجه العمود من الجائز، مما يدل على الدور الرئيسي للمفصل اللدن في تبديده للطاقة من خلال انحناء الجـائز (Beam Flexure).

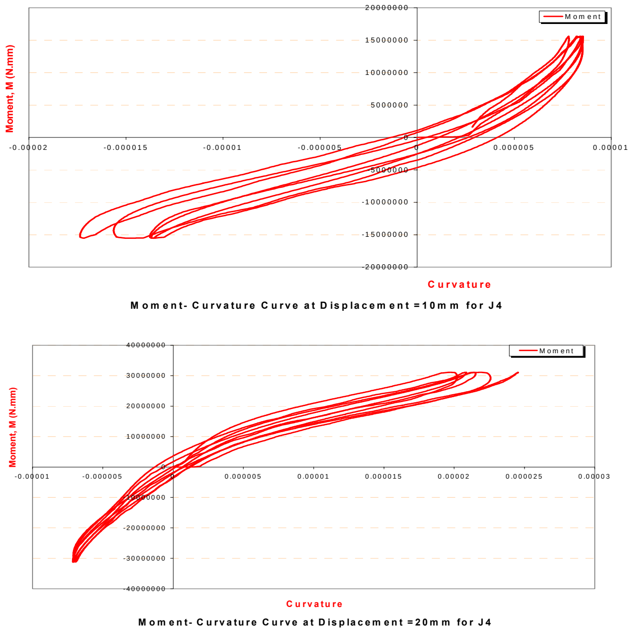


Moment - Curvature Last Hysteresis Loop at Displacement =2mm for J4

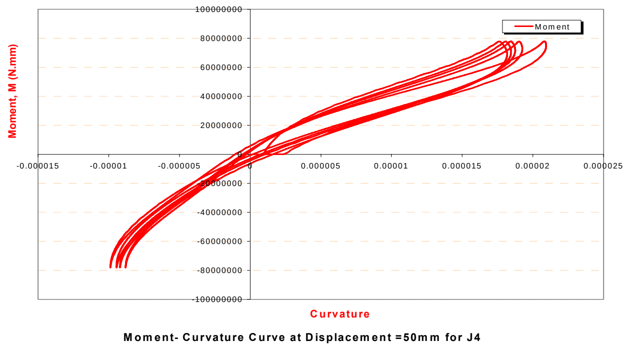


Moment-Curvature Curve at Displacement = 2mm for J4

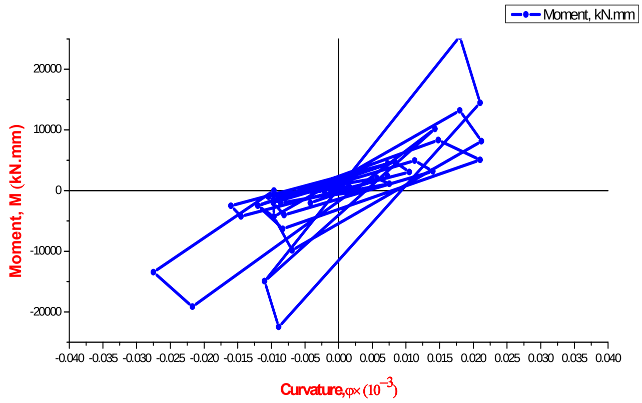
الشكل (١٠): الحلقة الأخيرة لمنحنى الاستجابة المتبقية للعزم – الانحناء للعينة (J4)، ومنحنى الاستجابة المتبقية للعزم - الانحناء عند تحميل انتقال قيمته $\Delta = 2mm$.



الشكل (١١): منحنى الاستجابة المتبقية للعزم – الانحناء للعينة (J4)،
عند تحميل انتقال قيمته، $\Delta = 8mm$ ، $\Delta = 13mm$ ، $\Delta = 20mm$.

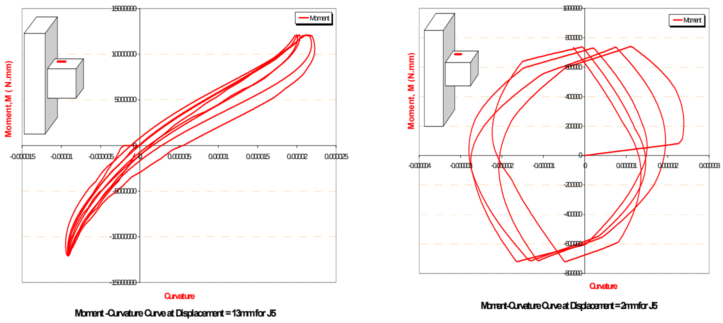


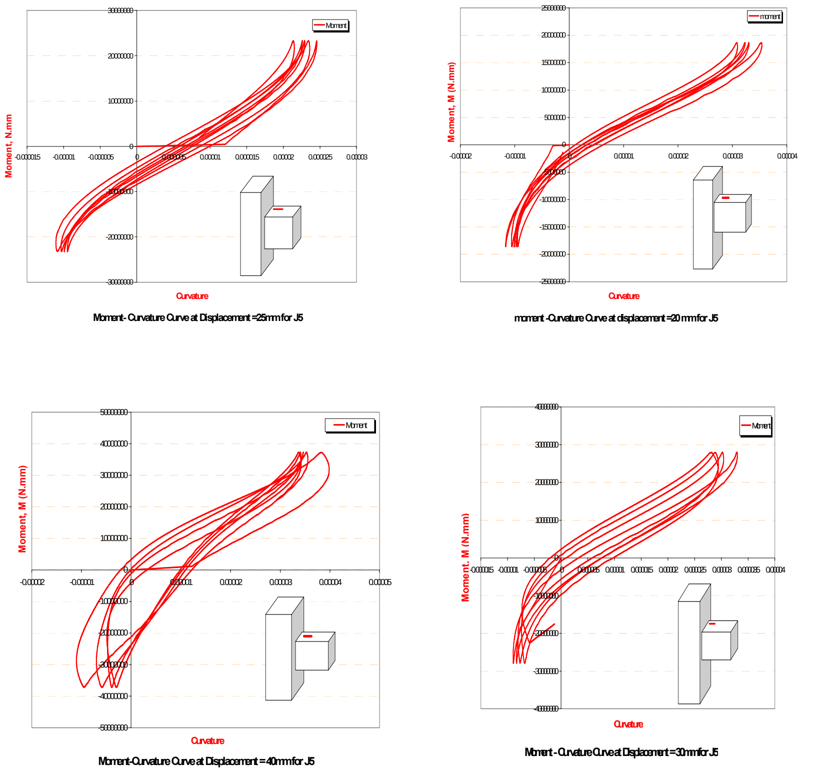
الشكل (١٢): منحنى الاستجابة المتبقية للعزم – الانحناء للعينة (J4)،
عند تحميل انتقال قيمته $\Delta = 50mm$.



الشكل(١٣):علاقة العزم – الانحناء للعينة J4 بمنحنى متبق (Hysteresis) يبين الطاقة المبددة تحت تأثير حمل دوري (انتقال- زمن).

نبين فيما يأتي بعض منحنيات الحلقة الأخيرة لاستجابة العزم – التقوس للعينـة (J5) تحت تأثير قيم الانتقالات المختلفة المطبقة على الطرف الحر لعينة وصلة خارجيـة لجائز مع عمود، كما في الشكل (١٤).





الشكل (١٤): الحلقة الأخيرة لمنحنى الاستجابة المتبقية للعزم – الانحناء للعينة (J5)، عند تحميل انتقال قيمته،

$\Delta = 2mm$ ، $\Delta = 13mm$ ، $\Delta = 20mm$ ، $\Delta = 25mm$ ، $\Delta = 30mm$ ، $\Delta = 30mm$

بسبب كثرة المعطيات العددية، ومن ثَمَّ كثرة المنحنيات، لم تعرض منحنيات استجابة العزم – التقوس للعينة (J1)، (J2)، (J3) ، ومعظم منحنيات العينة (J5)، تحت تأثير قيم الانتقالات المختلفة المطبقة على الطرف الحر لعينة وصلة خارجية لجائز مع عمود.

٥-٢- نتائج الاختبار والمناقشة Experimental Results and Discussion

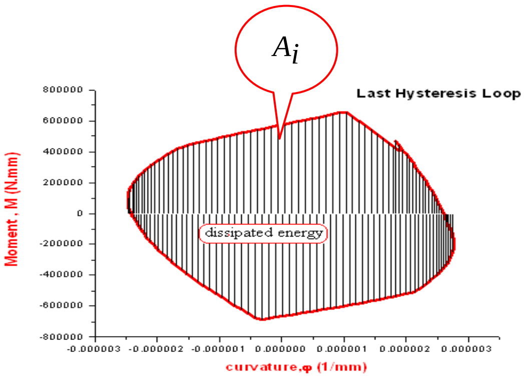
أجريت اختبارات الوصلة الخارجية لجائز – عمود من الخرسانة المسلحة تحت تأثير أحمال دورية محاكية للزلازل من أجل الوصول للسلوك اللا خطي للوصلة، من خلال نمذجة السلوك المتبقي لتبديد الطاقة بمنحنى العزم – الانحناء، و تعيين كمية الطاقة المبددة الناتجة من الضرر الإنشائي والتي تبين إمكانية استعمال الضرر الإنشائي (التشققات وتشكل المفصل اللدن) كآلية (ميكانيزم) لتبديد الطاقة الزلزالية.

وستتم منا قشة نتائج الاختبارات وتقييمها من خلال دراسة المتغيرات والعوامل الآتية:

٥-٢-١- الطاقة المبددة Dissipated Energy

ستعاني الوصلات تحت تأثير الزلازل القوية تشوهات لاخطية، وقابلية التشوهات اللاخطية لتبديد الطاقة الزلزالية أحد العوامل المهمة لتقييم كفاءة الوصلات الواقعة تحت تأثير الزلازل.

إيجاد الطاقة المبددة (Dissipated Energy) في العينة خلال دورة واحدة (E_i) من المساحة المغلقة الواقعة داخل الحلقة المتبقية للعزم – الانحناء كما هو مبين في الشكل (١٥).



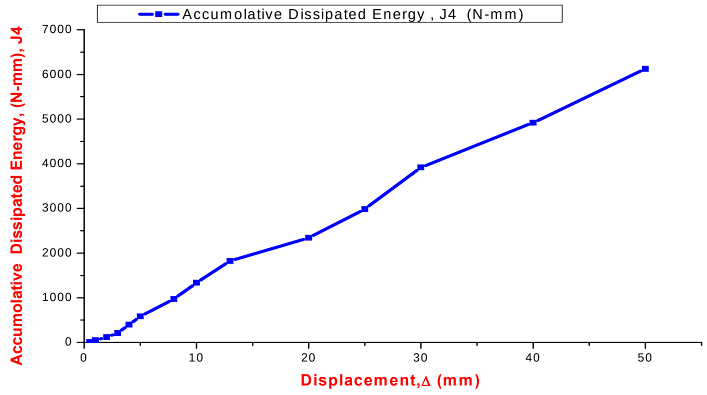
الشكل (١٥): الطاقة المبددة خلال دورة تحميل واحدة.
(Dissipated Energy During Single Loading Cycle)

حيث تعطى معادلة الطاقة المبددة بالمعادلة الآتية، ويمكـن حسـابها بـأي طريقـة ممكنة[9]:

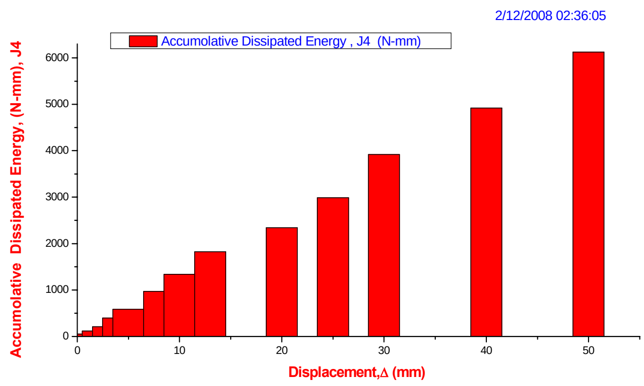
$$E_i = \int P_i . d\Delta_i = \int M_i . d\varphi_i = A_i \quad (٣)$$

حسبت الطاقة المبددة عند كـل مسـتوٍ مـن مسـتويات تحميـل الانتقـالات مـن $1mm \rightarrow 50mm$ للعينات الخمس ورسم منحنى الطاقة المبددة التراكمية والتخطيطية لكل عينة، وسنذكر منحنيات المقارنة بين العينات.

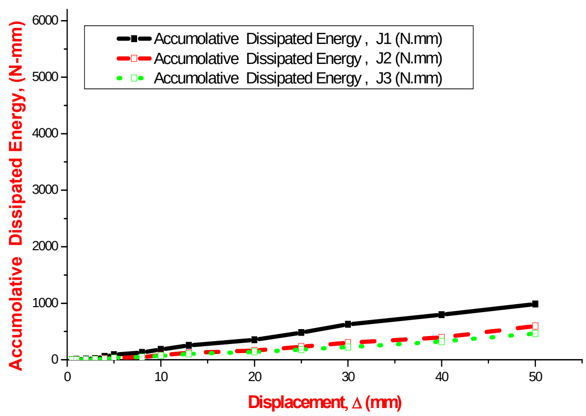
يبين الشكل (١٦)، منحنى يبين كمية الطاقة المبددة التراكمية والإفراديـة عنـد كـل مستوي تحميل للعينتين J4،J5.

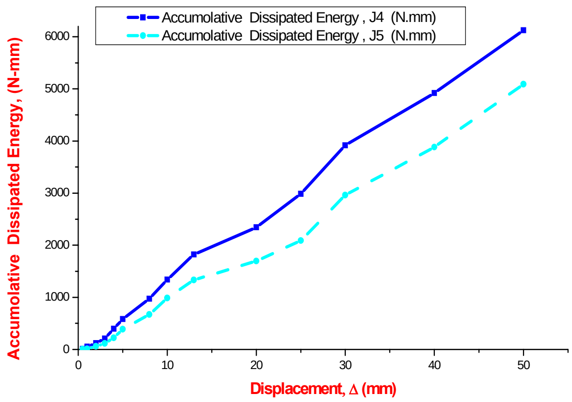


الشكل (١٦):منحنى الطاقة المبددة التراكمية عند كل مستوي تحميل للعينة J4،J5 .



الشكل (١٧): الطاقة المبددة التراكمية عند كل مستوي تحميل للعينة J4،J5 بشكل تخطيطي.

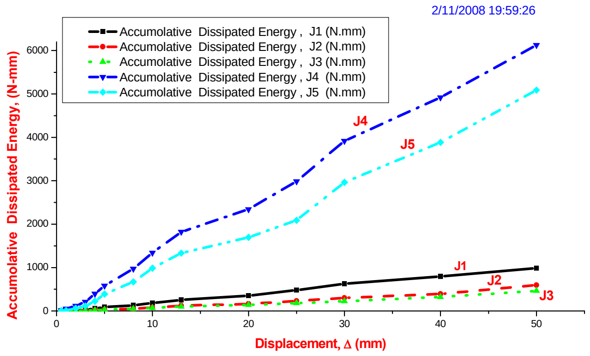




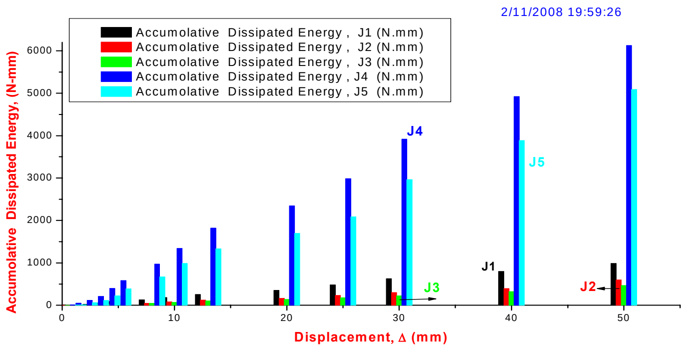
الشكل (١٨): مقارنة بين منحنيات الطاقة المبددة التراكمية عند كل مستوي تحميل للعينات J1، J2، J3 ، معاً، وJ4، J5 على حدة.

تعيين الطاقة الكلية المبددة من خلال جمع مساحة حلقات الاستجابة المتبقية لمنحنى العزم - التقوس عند كل مرحلة تحميل (أربع حلقات لكل مرحلة تحميل) من $\Delta = 50mm \leftarrow \Delta = 1mm$ ، للعينات J4،J5 ،J3،J2، J1 و يتم تعيين مساحة الحلقة الواحدة التي تمثل كمية الطاقة المبددة بواسطة التكامل العددي لمنحنى الاستجابة المتبقية العزم – التقوس.

يمكن رسم منحنى الطاقة التراكمية المبددة خلال كل دورة من دورات التحميل الدوري لعينات الاختبار، ويمكن الملاحظة بأن قيمة الانتقال كلما زادت فإن الطاقة المبددة تزداد، كما هو مبين في الأشكال (١٩)، (٢٠).

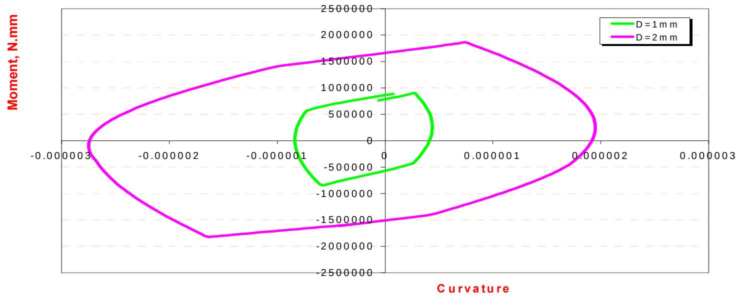


الشكل (١٩): مقارنة بين منحنيات الطاقة المبددة التراكمية في كل مرحلة تحميل.



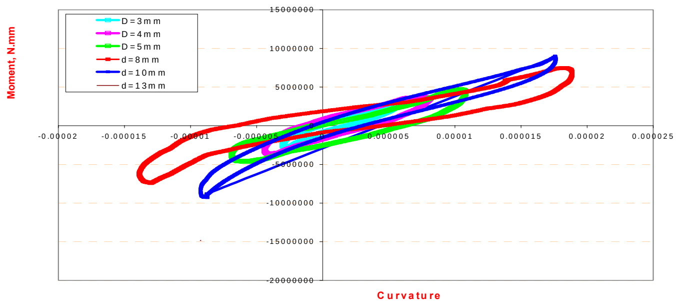
الشكل (٢٠): مقارنة منحنيات الطاقة التراكمية المبددة للعينات الخمس في كل مرحلة تحميل بشكل تخطيطي.

تتزايد الطاقة المبددة والممثلة بمساحة الحلقة الأخيرة المغلقة، مع تزايـد الانتقـالات المطبقة؛ وهذا يثبت إمكانية الاستفادة من هذا السلوك اللاخطي الممثل بالتشققات فـي المفصل اللدن كآلية لتبديد الطاقة الزلزالية، كما هو مبين في الشكلين (٢١)، (٢٢).



منحـــني الحلقـــة الاخـــيرة لاســـتجابة العـــزم - الانحنـــاء عنـــد تحميـــل الانتقـــالات المرنـــة 1mm , 2mm.

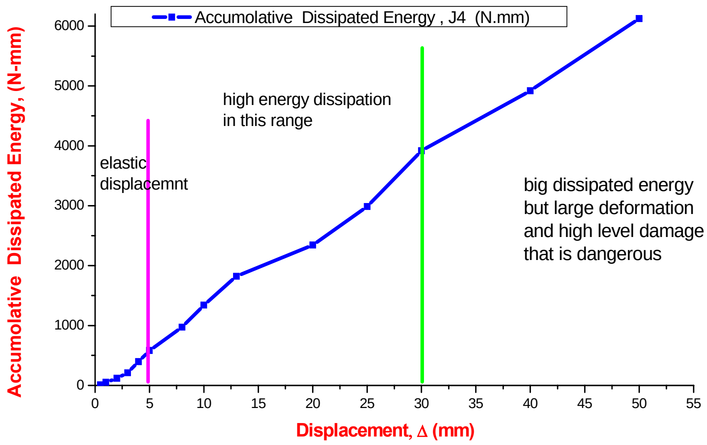
الشكل (٢١): يبين تزايد المساحة المغلقة لكل مرحلة تحميل مع تزايد الانتقالات المطبقة ومن ثم زيادة كمية الطاقة المبددة عند تحميل انتقالات $\Delta = 1mm, 2mm$ للعينة J5.



منحـــني الحلقـــة الاخـــيرة لاســـتجابة منحـــني العـــزم - الانحنـــاء عنـــد تطبيـــق الانتقـــالات 3mm , 4mm , 5 mm ، 13mm , 8mm ,10mm.

الشكل (٢٢): يبين تزايد المساحة المغلقة لكل مرحلة تحميل مع تزايد الانتقالات المطبقة ومن ثم زيادة كمية الطاقة المبددة عند تحميل انتقالات $\Delta = 3mm, 4mm, 5mm$ للعينة J5.

وقد تم تعيين مستويات تبديد الطاقة الفعالة وارتباطها بمقاومة الخرسانة في الضغط، ومجال الانتقالات التي يتعرض لها النموذج المختبر كما هو مبين في الشكل (٢٣).



الشكل (٢٣): منحني الطاقة المبددة مع الانتقال لنموذج العينة J4.

يمكن تقسيم منحنى الطاقة المبددة مع الانتقال لنموذج العينة J4 المبين في الشكل (٢٣)، إلى ثلاثة مجالات:

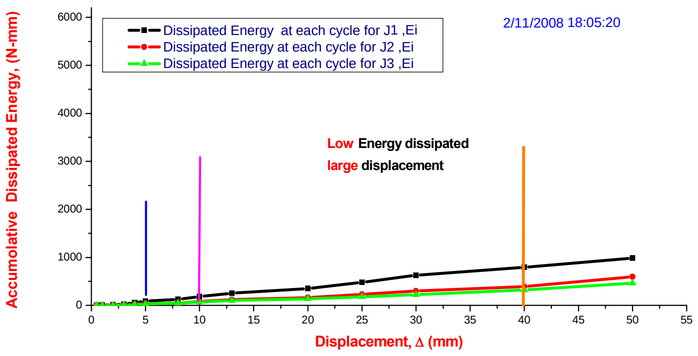
- المجال الأول: $\Delta = 0mm \rightarrow 5mm$ يكون فيه تبديد الطاقة ضعيفاً نسبياً ويعبر عن مجال الانتقالات المرنة والزلازل الضعيفة.
- المجال الثاني: وهو المجال $\Delta = 5mm \rightarrow 30mm$، ويكون فيه تبديد الطاقة في هذا المجال عالياً نسبياً، وهو مجال الانتقالات المتوسطة، وتكون آلية التبديد للطاقة فعالة.
- المجال الثالث: وهو المجال بدءاً من $\Delta = 30mm$ وما فوق، يكون تبديد الطاقة عالياً في هذا المجال على حساب تشوهات كبيرة،و ضرر كبير في المنشأة، وهذا ما يجب الابتعاد عنه من خلال تخفيف الانتقالات الناتجة عن الزلازل، ومن ثم يمكن القول: يمكن أن يكون عند هذا المستوي دور للمخمدات الفيسكوإيلاستيك المضافة لتبديد الطاقة الزلزالية.

ما سبق كان للعينة J4، وينطبق على العينة J5 والمتشابهة مع العينة J4 من حيث المقاومة المكعبية في الضغط، وظروف إجراء التجربة، وموضع أجهزة قياس الانفعالات الالكترونية.

وبالنسبة لدراسة منحني الطاقة الإفرادية المبددة مع الانتقال للعينات J1, J2, J3، المبين في الشكل (٢٤)، التي لها ظروف إجراء التجربة ذاتها، و مواقع أجهزة قياس الانفعالات الكترونية ذاتها على سطح الخرسانة قرب وجه العمود وفي مستوي التسليح العلوي والسفلي.

نلاحظ من الشكل (٢٤) أنه يمكن تقسيم المنحنى إلى ثلاثة مجالات وفي المجالات الثلاثة نلاحظ انخفاضاً في تبديد الطاقة على الرغم من وجود انتقالات كبيرة، ويمكن تفسيره كما يأتي:

- بانخفاض مقاومة الخرسانة للنماذج الثلاثة.
- فضلاً عن عدم تمكن أجهزة القياس الالكترونية المثبتة على سطح الخرسانة للوصلة بسبب خروجها عن العمل بعد تشقق الخرسانة وانكسارها، وعدم قدرتها على قياس التشوهات اللاخطية والسلوك اللدن لفولاذ التسليح.
- إذن الخرسانة الضعيفة لا تبدد الطاقة بشكل جيد، وهذه دعوة إلى أن تنفذ عناصرمعينة في المنشأة (وصلات الجوائز والأعمدة التي تتعرض لتشوهات لدنة كبيرة)، التي تقوم بتبديد طاقة المنشآت المقاومة للزلازل باستعمال خرسانة عالية المقاومة.



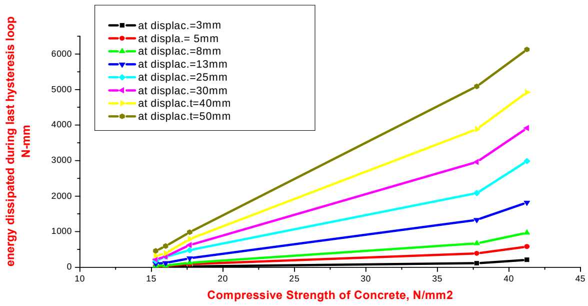
الشكل (٢٤): منحنى الطاقة المبددة مع الانتقال لنموذج العينة J1, J2, J3.

يبين الجدول(٣)، أهمية زيادة مقاومة الخرسانة في تبديد الطاقة عند مستوٍ معين للانتقالات.

جدول(٣): يبين قيم الطاقة المبددة في كل مرحلة تحميل، وقيم مقاومة الخرسانة لكل عينة.

رمز العينة	مقاومة الخرسانة $N/mm2$	الطاقة المبددة خلال كل مرحلة تحميل							
		$\Delta =$ 3mm	$\Delta = 5mm$	$\Delta = 8mm$	$\Delta = 13mm$	$\Delta = 25mm$	$\Delta = 30mm$	$\Delta = 40mm$	$\Delta = 50mm$
J1	16	6.44	29.64	46.84	102.8	178.84	222.84	322.84	462.84
J2	17.68	8.27	31.9	48.35	121.2	299.95	301.55	393.55	595.15
J3	15.30	25.3	89.08	128.3	254.7	479.3	626.18	795.78	986.18
J4	41.25	115.4	390.2	671.8	1335.8	2087.6	2962	3882.4	5088.4
J5	37.75	210.8	583.3	970.5	1822.5	2987.3	3917.3	4919.7	6126.1

يبين الشكل (٢٥)، أن تبديد الطاقة يزداد مع زيادة المقاومة بدءاً من انتقال $\Delta = 8mm$، ومن ثمّ أهمية رفع مقاومة الخرسانة في الضغط.



الشكل (٢٥): مقارنة بين مقاومة الخرسانة في الضغط، والطاقة المبددة لكل العينات المختبرة عند مستويات تحميل الانتقالات كلّها.

نلاحظ من الجدول (٣)، أنه يوجد تبديد كبير للطاقة بازدياد الانتقالات، ولكن تـزداد التشوهات والضرر الإنشائي كثيراً، وهذا ما نريد الابتعاد عنه، لأنه يشكل خطراً على المنشأة، ولذلك يمكن عند حد معين للانتقـالات أن نعمـد إلـى إضـافة مخمـدات الفيسكوإيلاستيك الصلبة (SVED)، إلى المنشأة من أجل ضبط التشـوهات الكبيـرة، وتخفيض استجابة كل من تسارع، وانتقالات، وسرعة المنشأة، وتبديد الطاقة الزلزالية الداخلة للمنشأة من خلال عمل المخمدات التي تعتمد على التشوهات اللاخطية الكبيرة من خلال السلوك المتبقي للمخمد في تبديد الطاقة، والحـد والتقليـل مـن الضـرر الإنشائي، وذلك بعد مستوٍ معين للضرر الإنشائي الموضعي والتشققات مـن تشـكل المفاصل اللدنة في الجوائز من تأثير الزلازل.

٥-٢-٢- المطاوعة Ductility

تعرف المطاوعة (Ductility) بأنها قدرة عنصر الخرسانة المسلحة في تحمل تشوهات كبيرة غير مرنة دون تدهور كبير في مقاومته، و يوجد أكثر مـن معيـار للضـرر (Damage Index)، لتحديد مطاوعة مقطع عنصر الخرسانة المسلحة نذكر منها:

١. عامل مطاوعة الانحناء The Curvature Ductility Factor.
٢. عامل مطاوعة الانتقال Displacement Ductility Factor.

٣. مؤشر الانزياح الأفقي Drift index.

٤. الانزياح الأفقي Drift.

٥. مؤشر الضرر المقترح من قبل بارك وانغ The Damage Index Proposed By Park & Ang (1984).

٦. عند تطبيق الانتقالات المتناوبة المحاكية للزلازل تحدث تشوهات كبيرة، ومن ثم دورانات كبيرة، تؤدي إلى دوران مقطع الجائز في منطقة المفصل اللدن (The Beam Plastic Hinge Zone)، وكذلك تشير قراءات الحساسات الالكترونية المثبتة على التسليح العلوي، والسفلي للجائز (Strain Gauges)، إلى أن التسليح الطولي للجائز يصل إلى حد الخضوع (Yield Limit)، بعد تشقق الخرسانة (Cracking Concrete)، ثم يدخل مرحلة حد التقسية (Strain Hardening)، مع مرحلة انكسار الخرسانة (Crushing Concrete) حيث تكون التشوهات الحاصلة أكبر بكثير من التشوهات الموافقة لحد الخضوع (Yield Strains)، ويبين الجدول (٤) أن التشوه الموافق لحد الخضوع في فولاذ التسليح الطولي للجائز هي تشوهات الخضوع (Yield Strains)، وكانت قد حدثت في مستو متأخر للانتقالات قرابة $\Delta_y = 10mm - 12mm$ وذلك للعينة J5 ،J4، في حين كانت $\Delta_y = 8,7.58,9.54mm$ للعينات J1، J2، J3، بالترتيب.

Maximum Level		Ultimate Level		yielding Level		Cracking Level		العينة
$Pmax$	Δmax	Pu	Δ_u	Py	Δy	P_{cr}	Δ_{cr}	
kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	
970.3	٥٠	747.2	38.5	155.25	8	58.2	٣	J1
1007	٥٠	799.53	39.7	152.6	7.58	60.4	٣	J2
932.3	٥٠	855.82	45.9	177.8	9.54	55.9	٣	J3
1537.5	٥٠	1537.5	50	344.41	11.2	92.3	٣	J4
1398.4	٥٠	1376	49.2	279.7	10	83.9	٣	J5

جدول(٤): قيم الانتقالات والقوى الموافقة.

٥-٢-٣- مؤشر مطاوعة الانتقال(Displacement Ductility Factor) [6, 9]

نبين قيم عامل مطاوعة الانتقال في الجدول (5)، مع ملاحظة أن الانتقال الموافق لحد الخضوع Δ_y من أجل كل العينات ضمن المجال $8 \rightarrow 12mm$ ، وقيم معامل المطاوعة تشير إلى أن وصلة جائز – عمود هي وصلة مطاوعة لأنها حققت العلاقة الآتية: $\mu_\Delta \rangle 4$ ، تم تصنيف عوامل المطاوعة في ثلاثة مستويات (ضعيف، متوسط، عالٍ)، هذه المستويات ملائمة للمطاوعة وتعتمد على شدة الزلزال وترددە، كما أن طريقة التصميم الزلزالي تتعلق بأهمية المنشأة، وموقع الوصلة في نظام المنشأة. المرجع [9]

عامل مطاوعة الانتقال Displacement Ductility Factor	الانتقال الموافق لـ٨٥% من الحمولة الحدية Displacement at 85% of the Ultimate Load	الانتقال الموافق لحد الخضوع Yielding Displacement	العينة
$\mu_\Delta = \Delta_{85} / \Delta_y$	$\Delta 85$ ، mm	Δy ، mm	
4.1	$38.5 \times 0.85 = 32.73$	8	J1
4.46	$39.7 \times 0.85 = 33.8$	7.58	J2
4.1	$45.9 \times 0.85 = 39.02$	9.54	J3
3.8	$50 \times 0.85 = 42.5$	11.2	J4
4.2	$49.2 \times 0.85 = 41.8$	10	J5

جدول (٥) : قيم عامل مطاوعة الانتقال (The Displacement Ductility Factor).

٥-٢-٤- مؤشر الضرر المقترح من قبل Park & Ang

The Damage Index Proposed By Park & Ang (1984)

سندرس مؤشر الضرر المقترح من قبل Park & Ang (1984) وفق القانون الآتي[7] :

$$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u . P_y} . \int dE_h \qquad (٤)$$

حيث:

δ_m : التشوه الأعظمي للاختبار (The Maximum Experimental Deformation).

δ_u : التشوه الأقصى للعنصر (The Ultimate Deformation Of The Element).

$E_h = \int dE_h$: الطاقة الممتصة في العنصر في أثناء منحنى التحميل المحاكي للزلازل.
the hysteretic energy absorbed by the element during the response) .(history

P_y: مقاومة حد الخضوع للعنصر (The Yield Strength Of The Element).

$\beta = 0.1 \times (Park\ \&\ Ang.,1987)$: عامل ثابت الموديل (β Is A Model Constant .(Parameter

يحسب نموذج ضرر(The Park & Ang damage model)، بجمع الضرر الناتج عن الانتقالات القصوى غير المرنة مع الضرر الناتج عن المنحنى الزمني للتشوهات بشكل خطي.

تحسب ثلاثة معايير للضرر باستعمال نموذج ضرر (The Park & Ang damage model)، وهي:

١. معيار ضرر عنصر $DI_{component}$: العمود أو جائز أو عناصر جدار قص.

٢. معيار ضرر الطابق DI_{story} : للمكونات العمودية والأفقية وضرر القص الطابق الكلي.

٣. معيار الضرر العام للمبنى $DI_{overall}$.

يتطلب التطبيق المباشر لنموذج الضرر على أساس معادلة (٤) كلاً من: عنصر المنشأة، الطابق، المبنى العام.

أُجريت التعديلات الآتية على النموذج الأصلي للنسخة، وذلك من أجل تعيين الضرر في المقطع العرضي لنهاية العنصر (Version 3.0 (Kunnath et al. 1992b) وفق العلاقة الآتية:

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y.\theta_u}.E_h \qquad (٥)$$

حيث: θ_m الدوران الأعظمي المنجز في أثناء منحنى التحميل، و θ_u الدوران الأقصى، و θ_r الدوران القابل للاسترجاع عند تفريغ التحميل، و M_y عزم الخضوع، و E_h الطاقة المبددة في المقطع.

جدول (٦): مؤشر الضرر المقترح من قبل Park & Ang
The Damage Index Proposed By Park & Ang (1984), [7]

العينة	δ_m	δ_u	P_y	$E_h = \int dE_h$	$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u . P_y} . \int dE_h$
	mm	mm	N	$N - mm$	
J1	٥٠	٣٩	١٥٥٢٥٠	986.2	$1.28 + 0.000016 = 1.28 \succ 1$
J2	٥٠	٤٢	١٥٢٦٠٠	595.15	$1.19 + 0.0000093 = 1.19 \succ 1$
J3	٥٠	٣٦	١٢١٩٠٠	462.84	$1.4 + 0.000011 = 1.4 \succ 1$
J4	٥٠	49	٣١٠٦٠٠	٦١٢٦	$1.02 + 0.00004 = 1.02 \succ 1$
J5	٥٠	٤٥	٢٥٧٣١٠	5088.4	$1.11 + 0.000044 = 1.11 \succ 1$

(٧):عرض مؤشر الضرر المعاير مع درجة الضرر الملاحظ في الوصلة .[7]
Interpretation of Overall Damage Index (Park et al. 1986)

Degree of Damage درجة الضرر	Physical Appearance المظاهر الفيزيائية	Damage Index مؤشر الضرر	State of Building حالة المنشأة
Collapse انهيار	Partial or total collapse of building خسارة كلية أو جزئية للمبنى	> 1.0	Loss of building خسارة المبنى
Severe عنيف	Extensive crashing of concrete; disclosure of buckled reinforcement يتأثر فولاذ التسليح يلتوي ويحنب ، تكسر شامل للخرسانة	0.4 - 1.0	Beyond repair غير قابل للاصلاح
Moderate معتدل	Extensive large cracks; spalling of concrete in weaker elements تفتت الخرسانة في العناصر الضعيفة و شقوق كبيرة شاملة	< 0.4	Repairable قابل للاصلاح
Minor صغير	Minor cracks; partial crushing of concrete in columns شقوق صغيرة و تكسر جزئي للخرسانة في الاعمدة		
Slight مهمل	Sporadic occurrence of cracking حدوث متقطع ومشتت للتشققات		

مما سبق يمكن تبرير الضرر الإنشائي (Damage) في وصلة جـائز- عمـود فـي حسابات التصميم، باستعمال مواد عالية المقاومة، إلى حد قد تجعل من الممكن إنشـاء

أنواع جديدة من المباني بمقاطع أصغر وأعمده أصغر، خصوصاً باعتماد التصميم للمطاوعة (Ductility)، وأيضاً التصميم لحالة الحد الأقصى للعمود والجائز (Ultimate Strength Design)، وضرورة التصميم المقاوم للزلازل في المستوي لوصلة جائز ضعيف مع عمود قوي Interior Beam-Column Connection in a (Weak-Beam Strong-Column)، لمنشأة إطارية، وعدم انهياره في أثناء الزلزال التصميمي للأسباب الآتية:

أ- يجب أن يتم تحميل حمل الجاذبية على الوصلة.

ب- توقّع المطاوعة الكبيرة وتبديد الطاقة في الوصلة غير ممكن.

ت- صعوبة إصلاح الوصلة بعد الزلازل.

ووفق العمل هذا يمكن تحمل القليل من الضرر شريطة بقاء المنشأة مترابطة ومستقرة في أثناء الزلزال، ولكن لا يسمح بحدوث انهيار في المنشأة تنجم عنه خسائر في الأرواح.

٦- استنتاجات Conclusions

١.يكون تبديد الطاقة ضعيفاً نسبياً في مجال الانتقالات المرنة والزلازل الضعيفة، في حين يكون التبديد كبيراً في الطاقة بزيادة الانتقالات، ولكن تزداد التشوهات والضرر الإنشائي كثيراً، وهذا ما نريد الابتعاد عنه، لأنه يشكل خطراً على المنشأة،ولذا استعمال نظام آلية السلوك غير المرن للضرر الإنشائي الموضعي التي تزود المنشأة بإمكانية لتبديد الطاقة الكامنة وحدها غير كاف.

٢. يبرر الضرر الإنشائي (Damage) في وصلة جائز- عمود في حساب التصميم، استعمال مواد عالية المقاومة، إلى حد قد تجعل من الممكن إنشاء أنواع جديدة من المباني بمقاطع أصغر وأعمده أصغر، خصوصاً باعتماد التصميم للمطاوعة (Ductility).

٣. الخرسانة الضعيفة لا تبدد الطاقة بشكل جيد، وهذه دعوة إلى أن تنفذ عناصرمعينة في المنشأة (وصلات الجوائز والأعمدة التي تتعرض لتشوهات لدنة كبيرة)، التي تقوم بتبديد الطاقة المنشآت المقاومة للزلازل باستعمال خرسانة عالية المقاومة.

٤. تتزايد الطاقة المبددة والممثلة بمساحة منحنى الاستجابة المتبقية للعزم – القوس عند كل قيمة انتقال، مع تزايد الانتقالات المطبقة، وهذا يثبت إمكانية الاستفادة مـن هـذا السلوك اللاخطي الممثل بالتشققات في المفصل اللدن كآلية لتبديد الطاقة الزلزالية.

٧- توصيات (Recommendations)

- تبني مبدأ العمود القوي والجـائز الضـعيف (Strong column –Weak Beam Principle)، والذي تكون من خلاله نسبة مجموع العزوم المقاومة للأعمدة فـي أي وصلة إلى مجموع العزوم المقاومة للجوائز في هذه الوصلة أكبر من عامـل أمـان محدد (١.٢) وفق الكود السوري. ومن ثم إذا تعرض بناء إلى انتقال غير مرن تتشكل المفاصل اللدنة في جوائز إطاراته وتبقى الأعمدة ضمن حد المرونة (الخضوع).
- دراسة الوصلة مع مواد جديدة في التسليح مثل الفيبر والألياف الكربونية بدلاً مـن قضبان التسليح التقليدية .
- دراسة أنواع أخرى من الوصلات غير المتناظرة.

References

[1] الملحق رقم (٢) للكود العربي السوري، الخـاص بتصـميم وتحقيـق المبـاني والمنشآت المقاومة للزلازل ٢٠٠٥، دمشق

[٢] محاضرات (١،٣،٦،٧) دورة تأهيل المهندسين فـي تصـميم المبـاني المقاومـة للزلازل، نقابة المهندسين السوريين في حلب ٣٦-١٩٩٦/١٠/٣١.

[3] لجنة الكود (ACI- 352)، المعهد الأمريكـي للخرسـانة (American Concrete Institute).

[4] نزيه صالوم، "مقاومة المواد"، منشورات جامعة تشرين، 1988.

[5] مشهور غنيم، "محاضرات الخرسانة المسلحة"، جامعة القاهرة، الجيزة، مصـر، 1999.

[6] Kazuhiro, K., Otani, Sh., and Aoyama, H., " Earthquake Resistant Design Criteria for Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints", Pacific Conference on Earthquake Engineering, Wairakei University of Tokyo, Japan, at New Zealand, August 5 - 8, 1987, Vol. 1, pp. 315 - 326.

[7] Kunnath, S., "Enhancements to Program IDARC: Modeling Inelastic Behavior of Welded Connections in Steel Moment-Resisting Frames", Building and Institute of Standard and Technology Gaithersburg, May 1995.

[8] Langhaa, H. L., "Dimensional Analysis and Theory of Model ", 1951.

[9] Mahdy, T., El-Zanaty, A., H., "Seismic Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Beam- Column Joints with and Without Steel Fibers", Cairo university, Giza, Egypt, February 2002.

[10]Whittaker, A., "Seismic Analysis and Design of Framed Building", 1996.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: ٢٠٠٨/٥/٢٩.