مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (9) العدد(5)1998
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (19)No (5)1998

السلوك الفتلي غير المرن للمنشآت البيتونية خلال الاستجابة الزلزالية

الـــدكتور نائـــل حســـن*
الدكتور دريد سلوم**

(قبل للنشر في 1998/2/26)

❐ ملخص ❐

تهتم هذه المقالة بدراسة السلوك الفتلي غير المرن للمنشآت البيتونية خلال الاستجابة الزلزالية بهدف تزويد المصمم بالمعايير اللازمة، لحل مشكلة الفتل غير المرن خلال مرحلة التصميم الأولي بحيث يمكن اتخاذ قرار مبكّر عن ملائمة المخطط الإنشائي. مقاومة الفتل الإضافية، اللامركزية، والمقاومة النسبية بين العناصر الإنشائية المقاومة والمتعلقة بالفتل غير المرن.

تتعرض الأبنية على اختلاف أنظمتها الإنشائية ومواد بنائها أثناء الاستجابة الزلزالية لقوى فتلية هامة، تسبب تأثيرات أكبر من تلك الناتجة عن التشوهات الانتقالية، حيث تزداد المقاومة المطلوبة والانحراف النسبي الطابقي في أجزاء معينة من المنشأة.

تعتبر المنشآت البيتونية، التي تعتمد على جدران القص كلياً أو جزئياً في أنظمتها الإنشائية لمقاومة الزلازل، الممثل الأساسي للأنظمة غير المرنة، لذلك سيؤدي تصميمها - باعتبار تأثيرات الفتل مرنة السلوك- إلى الحصول على منشآت ذلك مقاومة ضعيفة على الفتل، يمكن أن تصل في تشوهاتها القصوى خلال الاستجابة غير المرنة لحدود تشكل ميكانيزم فتل، يؤدي لأضرار هامة أو ربما لانهيار كلي. تم في هذه المقالة اقتراح طريقة تعتمد على التحليل الحدي لدراسة غير المرن انطلاقاً من مجموعة حالات خاصة مبسطة، تغطي مجالاً واسعاً من أنظمة المنشآت البيتونية المستخدمة في القطر، بحيث يمكن بالاستناد إلى هذه الطريقة، الحصول على دلائل إرشادية واضحة تستعمل خلال التصميم الزلزالي الأولي للمنشأة بغية اعتبار التأثيرات الفتلية غير المرنة أثناء الاستجابة الزلزالية.

---

* مدرس في قسم الهندسة الإنسائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية
** مدرس في قسم الهندسة الإنسائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (؟؟) العدد (؟) ؟؟؟؟؟
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (??) No (?) ?????

INELASTIC TORSION OF CONCRETE BUILDINGS IN THE CASE OF EARTHQUAKE RESPONSE

Dr. Nayel HASSAN*
Dr. Doraid SALLOUM**

(Accepted 26/2/1998)

❐ ABSTRACT ❐

It is known that the effects of the inelastic torsion for seismic design are very considerable. Torsion causes that the demanded strength and interstory drift to be larger that those required by just transitional deformation. These effects differ for elastic and inelasitc behavior tending to be larger when inelastic behavior involves a torsional mechanism of the structure. A clear contradiction exist in the present consideration of torsional effects during the design process because torsional effects are leastically considered, while most of the seismic code design methodology is based on the safety level earthquake.

This paper shows that for a special class of real buildings built in Syrian Coast, the reduction in the building strength resulting from inelastic torsion can be obtained using the classical theorems of plastic analysis. By analyzing an auxiliary structure a simplified formula for the reduction in strength dur to inelastic torsion is obtained. Using this simplified formula, guidelines to control inelastic torsion during preliminary seismic design are offered. All calculations of the special problems taken consideration were performed using a visual-Basic Computer program written by the authors.

* Lecturer at Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.
** Lecturer at Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

المقدمة:

تتعرض الأبنية على اختلاف أنظمتها الإنشائية ومواد بنائها أثناء الزلزال لقوى فتلية هامة، تسبب تأثيرات أكبر من تلك الناتجة عن التشوهات الانتقالية، حيث المقاومة المطلوبة والانحراف النسبي الطابقي في أجزاء معينة من المنشأة. تشتد حدة التأثيرات الناتجة عن الفتل بزيادة المسافة بين مركز صلابة ومركز كتلة المنشأة. تختلف هذه التأثيرات في حالة السلوك المرن للمنشأة عنها في حالة السلوك غير المرن، حيث تميل لأن تكون أكبر عندما يتضمن السلوك غير المرن تشكل ميكانيزم فتل في المنشأة. أيضاً يمكن أن تزداد التأثيرات الفتلية بشكل كبير تبعاً للموقع الأول لمركز مقاومة الفتل وتبعاً لكيفية تغير هذا المركز ولامركزية مقاومة الخضوع الكلية خلال عملية خضوع المنشأة[2].

خلّفت الزلازل الماضية في مختلف دول العالم أمثلة عديدة حول الأداء السيئ للأبنية ذات المقاومة الضعيفة إنشائياً على الفتل. على سبيل المثال، اعتبرت تأثيرات الفتل العامل الرئيس المسؤول عن الضرر أو الانهيار الحاد لعدة أبنية خلال زلزال المكسيك في أيلول (سبتمبر) علم 1985م.[3،4]. يعتبر انهيار بناء (El Faro) خلال زلزال التشيلي عام 1985م. مثالاً آخر لتأثير الفتل المرن على الانهيار أثناء الزلازل[5]. أيضاً تعتبر نتائج زلزال مدينة يريفان (جمهورية أرمينيا) من خلال انهيار وتضرر الكثير من الأبنية عام 1988م. بسبب التأثيرات الفتلية غير المرنة[14]، إيضاحاً آخر لأهمية السلوك غير المرن.

لقد اهتمت أغلب الأبحاث الماضية بدراسة الاستجابة المرنة للأبنية مما جعل أغلب كودات التصميم تستند على اعتبار تأثيرات الفتل مرنة بشكل رئيسي خلال عملية التصميم، وهذا يتناقض مع السلوك الحقيقي غير المرن الهام والمتوقع حدوثه خلال تعرض الأبنية للزلازل.

تحول التركيز في السنوات الأخيرة إلى دراسة الأنظمة غير المرنة بهدف الحصول على نتائج عملية عند تصميم الأبنية[6،7،8،9،10،11،12]. على كل حال، وبسبب كثرة المتحولات اللازمة لتحديد الاستجابة غير الخطية وتعقيدات طبيعة دراستها، فإنه لا يمكن بسهولة إدخال النتائج في توصيات التصميم. عموماً، في الأبنية ذات المقاومة الكبيرة على الفتل، تؤثر مزدوجة الفتل على التشوهات الأعظمية في الأنظمة غير المرنة بدرجة أقل من الأنظمة المرنة خطياً[12]. من ناحية أخرى، في الأبنية ذات المقاومة الضعيفة على الفعل، يمكن أن تكون التشوهات القصوى للاستجابة غير المرنة (أنظمة غير مرنة) أكبر إلى حد بعيد من التشوهات الحاصلة في السلوك المرن (أنظمة مرنة)[9]. يُستنتج مما سبق أن الأنظمة غير مرنة السلوك يمكن أن تتأثر بأضرار هامة نتيجة الفتل غير المرن للمنشآت، إذا كانت

مقاومتها ضعيفة على الفتل، أي، إذا لم يتم تجنب احتمال تشكل ميكانيزم فتل خلال الاستجابة الزلزالية.

تعتبر المنشآت البيتونية، التي تعتمد على جدران القص كلياً أو جزئياً في أنظمتها الإنشائية لمقاومة الزلازل، الممثل الأساسي للأنظمة غير المرنة (بسبب الخواص الميكانيكية لمادة البيتون الكبير نسبياً لكتل عناصرها)، لذلك سيؤدي تصميمها باعتبار تأثيرات الفتل مرنة السلوك، إلى الحصول على منشآت ذات مقاومة ضعيفة على الفتل، يمكن أن تصل في تشوهاتها القصوى خلال الاستجابة غير المرنة لحدود تشكل ميكانيزم فتل، يؤدي بدوره لأضرار هامة أو ربما لانهيار كلي. بهدف تجنب تشكل ميكانيزم فتل، تَمَّ في هذه المقالة اقتراح تعتمد على التحليل الحدي (وفق حالات الحدود) لدراسة الفتل غير المرن انطلاقاً من مجموعة حالات خاصة مبسطة، تتضمن متحولات عامة، لتغطي مجالاً واسعاً من أنظمة المنشآت البيتونية المستخدمة في القطر، بحيث يمكن بالاستناد إلى هذه الطريقة، الحصول على دلائل إرشادية واضحة تستعمل خلال التصميم الزلزالي الأولي للمنشأة بغية الأخذ بعين الاعتبار التأثيرات الفتلية غير المرنة أثناء الاستجابة الزلزالية.

1- الهدف من المقالة ومجالات الاستخدام:

يعمل المهندس على وضع تصميم أولي فعال ينتج عنه تصميم نهائي اقتصادي، أمين ويؤدي وظيفته الاستثمارية. لقد طوّرت مؤخراً برامج كمبيوتر كفوءة ذات صلة بالموضوع، لتحليل المنشآت المعقدة، إلا أنها لا تضمن تصميماً كفئاً بالضرورة، خصوصاً في حالة التصميم المقاوم للزلازل. بغض النظر عن كيفية جعل برامج الكمبيوتر هذه كفوءة، فإن التحليل المتكرر لتصميم أولي غير جيد عادة سيقود فقط إلى تصميم نهائي غير جيد محسن. تهدف هذه المقالة إلى تزويد المصمم بالمعايير اللازمة، على شكل عددي، لحل مشكلة الفتل غير المرن للمنشآت خلال مرحلة التصميم الأولي بحيث يمكن اتخاذ قرار مبكر عن ملائمة المخطط الإنشائي، فائض الفتل (مقاومة الفتل الإضافية)، اللامركزية، والمقاومة النسبية بين العناصر الإنشائية المتعلقة بالفتل غير المرن.

بما أن تفصيلات عناصر المنشأة ومتطلبات الزلزال المحلية غير معروفة خلال مرحلة التصميم الأولي فإنه يمكن تبني نموذج عام مبسط ثلاثي الأبعاد لتمثيل السلوك الزلزالي خلال تلك المرحلة التصميمية. علماً أنه لا يمكن من خلال هذه النمذجة المبسطة اعتبار بعض المؤثرات ثلاثية الأبعاد (الفراغية)، التي قد تؤدي لزيادة متطلبات بعض عناصر المنشأة تجاه الزلازل المحلية. بشكل خاص، التفاعل الفتلي الانحنائي ثلاثي الأبعاد، والذي يمكن أن يمتلك تأثيراً هاماً على سلوك الجدران والأعمدة، إضافة إلى التركيز الموضعي للقوى الزلزالية

نتيجة تأثيرات الطوابق المتعددة[14،15]. إن دراسة هذه التأثيرات هي موضوع تحليلي معقد، يحتاج إلى استخدام برامج ثلاثية الأبعاد لآلية الانهيار ذات كلفة عالية، حيث تصاغ المنشأة بوساطة نماذج عناصر خاصة، تتشكل فيها مفاصل لدنة، تمكن من تنفيذ تحليل لدن (Plastic Analysis). على أية حال، إذا تم إنجاز تصميم أولي أمين، مثلاً، باستعمال الإجراء المقترح في هذه المقالة، فإنه في أكثر الحالات يمكن تجنب النتائج الضارة لهذه التأثيرات على الاستجابة العامة للبناء من خلال التفصيلات الحذرة للعناصر الحرجة خلال مرحلة التصميم النهائي[1].

2- دراسة الفتل غير المرن للمنشآت:

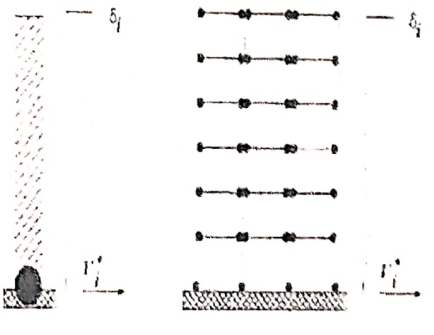
سوف نعتبر في هذه الدراسة بناءً ثلاثيَّ الأبعاد مكون من N طابق يعمل ضمن مجال مرن لدن وتتحقق فيه الخصائص التالية:

1- تقع مراكز كتل كل الطوابق على خط شاقولي واحد؛

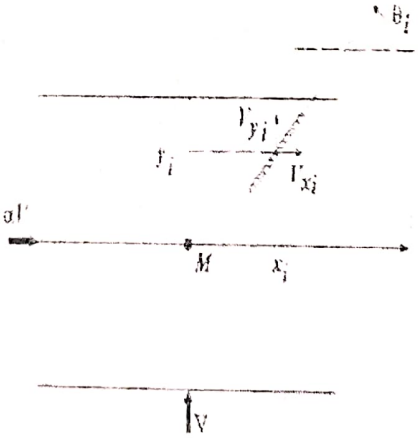
2- تُقاوم الأحمال الجانبية بواسطة عناصر إنشائية مستمرة على طول ارتفاع البناء (إطارات و/أو جدران)؛

3- تتشكل المفاصل اللدنة كما في الشكل رقم (1)، لكل عنصر إنشائي (إطار أو جدار) على كامل ارتفاع البناء؛

4- يملك كل عنصر إنشائي قوة قص قاعدية بالإزاحة العليا كما هو مشار في الشكل رقم (1)، أي أنه، يجب أن تتشكل كل المفاصل اللدنة في الوقت نفسه كي ينتج الميكانيزم؛



الشكل (1): أماكن تشكل المفاصل اللدنة للعنصر i (إطار/جدار)



الشكل (2): نموذج بناء بطابق واحد

سيتم التحليل اللدن للبناء المذكور أعلاه عن طريق دراسة بناء بطابق واحد كما هو ممثل في الشكل رقم (2). إن مقاومة الخضوع V^*ي لكل عنصر إنشائي مقاوم i توافق قص الخضوع القاعدي. اعتبرت القوة الزلزالية مؤثرة في مركز الكتلة M بمركبتين V وαV على طول المحاور y وx، على التوالي. يتطابق المحور y، حيث نقطة المبدأ هي مركز الكتلة M، مع الاتجاه الرئيسي للمنشأة (عُرف كاتجاه للحركة الأرضية الزلزالية، حيث ستنتج الاستجابة القصوى للنمط الاهتزازي الأساسي). يشكل كل عنصر إنشائي مقاوم i زاوية θ_i مع المحور x.

نعرف موقع العنصر i بالإحداثيات x_i,y_i ، فتكون مقاومات الخضوع باتجاه المحاور y,x هي $\left(V_{xi}^* = V_i^* \cos\theta_i \ , \ V_{yi}^* = V_i^* \sin\theta_i\right)$، والقوى باتجاه المحاور y,x هي $\left(V_{xi} = V_i \cos\theta_i \ , \ V_{yi} = V_i \sin\theta_{ii}\right)$. يعرف مركز المقاومة R بأنه النقطة في مخطط الدسك الصلب (بلاطة الطابق المستقل)، التي يجب أن تطبق القوة فيها كي يكون الدسك الصلب متوازناً مع مقاومة الخضوع $\left(V_{xi} = V_{xi}^*, V_{yi} = 0\right)$ من أجل الاتجاه x، ومتوازناً مع مقاومة الخضوع $\left(V_{xi} = 0, V_{yi} = V_{yi}^*\right)$ من أجل الاتجاه y. إذن، إحداثيات R هي:

$$x_R = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^* x_h}{\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^*} \ , \ y_R = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{xi}^* y_i}{\sum_{i=1}^{n} V_{xi}^*} \quad (1a,b)$$

تحسب حمولة انهيار المنشأة V^* وفقاً لنظيرات التحليل اللدن[16]، حيث يمكن باستعمال النظرية الستاتيكية للتحليل اللدن صياغة حمولة الانهيار للنظام (القوة القصوى) V^* وفق وفق معادلات التوازن التالية:

$$\sum_{i=1}^{n} V_{yi} + V^* = 0 \quad (2a)$$

$$\sum_{i=1}^{n} V_{yi} + \alpha V^* = 0 \quad (2b)$$

$$-\sum_{i=1}^{n} V_{xi} y_i + \sum_{i=1}^{n} V_{yi} x_i = 0 \quad (2c)$$

شروط اللدونة:

$$|V_{xi}| \le V_{xi}^* \ ; \ |V_{yi}| \le V_{yi}^* \quad (3a,b)$$

يلاحظ أن V_{xi} وV_{yi} يمكن أن تكون موجبة أو سالبة، بينما V_{xi}^* و V_{yi}^* موجبة دائماً. في المعادلة (2)، يتم اختيار جهة αV على طول x بحيث تزيد الفتل حول R والناتج عن القوة V على طول y[17].

نحصل على أفضل تصور عن طبيعة المسألة باستعمال النظرية الكينيماتيكية وطريقة تجميع الميكانيزمات (جمع الآثار) (The method of superpostion of mechanisms).
فيما يلي ثلاث ميكانيزمات مستقلة مع معادلات توازنها الخاصة:

m_1: الانتقال على طول x

$$\sum_{i=1}^{n} V_{xi} + \alpha V = 0 \quad (4)$$

m_2: الانتقال على طول y

$$\sum_{i=1}^{n} V_{yi} + V = 0 \quad (5)$$

m_3: الانتقال على طول M

$$\sum_{i=1}^{n} V_{xi} y_i + \sum V_{yi} x_i = 0 \quad (6)$$

يمكن تشكيل الميكانيزمات المجمعة $m_j (j>3)$ بوساطة التجميع (التراكب الخطي للميكانيزمات m_1، m_2 وm_3. يمكن اعتبار أي من هذه الميكانيزمات المجمعة على أنه دوران حول النقطة T (مركز الفتل) من المستوى x-y.إذا كانت x_T وy_T إحداثيات النقطة T، فإن حمولة الانهيار V_j^* للمكانيزمات المجمعة هذه يمكن أن تُحسب باستعمال نظرية الإزاحة الافتراضية كالتالي[2]:

m_j: الدوران حول T

$$V_j^*\left(|x_T| + \alpha |y_T|\right) = \sum_{i=1}^{n} V_{xi}^* |y_i - y_T| + \sum_{i=1}^{n} V_{yi}^* |x_i - x_T| \quad (7)$$

يمثل الميكانيزم المجمع m_j ميكانيزم الانهيار الحقيقي، الذي ينتج عنه كحد أدنى $V_j^* = V^*$.

3- دراسة السلوك الفتلي غير المرن لبعض الحالات الخاصة:

3-1- أسس الحساب:

لتحديد المتحولات الرئيسة التي تحكم السلوك غير المرن لمنشأة، يكون ميكانيزم الانهيار فيها ميكانيزم فتل، سنقترح موديلاً إنشائياً مساعداً. هكذا بدلاً من حساب حمولة انهيار المنشأة الحقيقية (التي يمكن أن تكون معقدة)، سنحصل على قيمة تقريبية مقبولة للتصميم الأولي، عن طريق حساب ميكانيزم الانهيار لهذا الموديل الإنشائي المساعد. يعرف هذا الموديل بحيث يحقق الشروط التالية:

1- يملك المقاومة الكلية نفسها $\sum V_{xi}^*$ و $\sum V_{yi}^*$ للميكانيزم الانتقالية على طول المحور x والمحور y، على التولي، التي تملكها المنشأة الحقيقة.

2- يملك مقاومة الفتل نفسها M_R^* حول R تملكها المنشأة الحقيقية من أجل الميكانيزم الفتلي حول R.

3- يملك مركز الكتلة نفسه M ومركز المقاومة R اللذين تملكهما المنشأة الحقيقية.

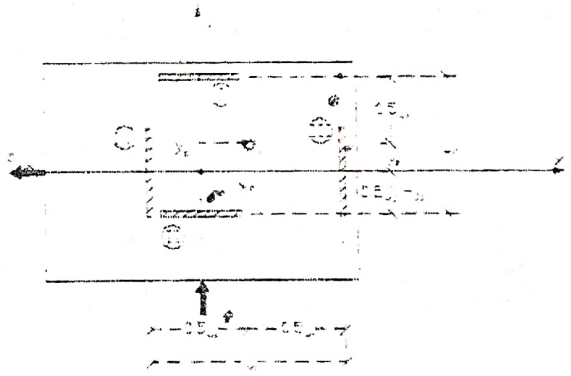
4- يملك عناصر إنشائية بمقاومة خضوع $\sum V_{xi}^*$ بالاتجاه المحور x، ويملك عناصر إنشائية بمقاومة خضوع بالاتجاه المحور y.

يحدد ذراعا الفتل j_x وj_y للمنشأة الحقيقية بحيث تُعرف المقاومة الفتلية الكلية M_R^*، المكافئة لتشكل ميكانيزم فتل حول مركز المقاومة R، من خلال كتابة المعادلة التالية[8]:

$$M_R^* = \sum_{i=1}^{n} V_{yi}^* |x_1 - x_R| + \sum_{i=1}^{n} V_{xi}^8 |y_1 - y_R| = j_x \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} V_{yi}^* + j_y \sum_{i=1}^{n} V_{xi}^* \quad (8)$$

من المعادلة (8) يحدد ذراعا الفتل كالتالي:

$$j_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^* |x_1 - x_R|}{(1/2)\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^*}; \quad j_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^* |y_1 - y_R|}{(1/2)\sum_{i=1}^{n} V_{xi}^*}; \quad 9a,b)$$



الشكل (3): الموديل الإنشائي المساعد

يمكن إعداد الموديل الإنشائي المساعد (الشكل 3)، الذي يحقق المتطلبات السابقة، بواسطة العناصر الإنشائية المقاومة I،II،III و IV المحددة بالإحداثيات:

$$x_I = 0; x_{II} = 0; x_{III} = \frac{j_x}{2} + x_R; x_{IV} = -\left(\frac{j_x}{2} - x_R\right) \quad (10a,b)$$

$$y_I = \frac{j_y}{2} + y_R; y_{IV} = -\left(\frac{j_y}{2} - y_R\right); y_{II} = 0; y_{IV} = 0 \quad (10e\text{-}h)$$

وبالمقاومات:

$$V_{xI}^{*} = V_{xII}^{*} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} V_{xi}^{*};\ V_{xIII}^{*} = V_{xIV}^{*} = 0 \quad (11a,b)$$

$$V_{yIII}^{*} = V_{yIV}^{*} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^{*};\ V_{yI}^{*} = V_{yII}^{*} = 0 \quad (11c,d)$$

من السهل ملاحظة أن ميكانيزم الفتل لهذا الموديل الإنشائي المساعد يتشكل عندما تخضع العناصر الإنشائية المقاومة II و IV، إذن، يحدد مركز الدوران T لميكانيزم الفتل هذا بالإحداثيات.

$$x_T = x_{III} = \frac{j_x}{2} + x_R\ ;\ y_T = x_I = \frac{j_y}{2} + y_R \quad (12)$$

بسبب كون مركز المقاومة R للموديل الإنشائي المساعد سيقع بين النقطتين M و T مهما كانت إشارة الإحداثيتين x_R و y_R، فإنه يمكن تعميم المعادلة (12) لتأخذ الشكل التالي:

$$|x_T| = \frac{j_x}{2} + |x_R|\ ;\ |y_T| = \frac{j_y}{2} + |y_R| \quad (13a,b)$$

من المعادلة (7)، نحصل على حمولة الانهيار V_T^{*} الموافقة لميكانيزم الفتل هذا باستعمال العلاقة

$$V_T^{*}\left(|x_T| + \alpha|y_T|\right) = V_{xII}^{*}|y_{II} - y_I| + V_{yIV}^{*}|x_{IV} - x_{III}| \quad (14)$$

بتبديل المعادلات (10)، (11)، (13) في المعادلة (14) ينتج:

$$V_T^{*} = \frac{1}{2}\frac{j_y\sum_{i=1}^{n} V_{xi}^{*} + j_x\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^{*}}{\frac{j_x}{2} + |x_R| + \alpha\left(\frac{j_y}{2} + |y_R|\right)} \quad (15)$$

بتعريف العامل γ على أنه نسبة المقاومة باتجاه المحور x إلى المقاومة باتجاه المحور y أي:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{xi}^{*}}{\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^{*}} \quad (16)$$

يمكن كتابة المعادلة (15) كالتالي:

$$V_T^{*} = \frac{1}{2}\frac{j_x + \gamma j_y}{\frac{j_x}{2} + |x_R| + \alpha\left(\frac{j_y}{2} + |y_R|\right)}\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^{*} = \beta\sum_{i=1}^{n} V_{yi}^{*} \quad (17)$$

يتوقع تشكل الميكانيزم الفتلي عندما $\beta<1$. في هذه الحالة تمثل β نسبة انخفاض مقاومة المنشأة نتيجة التأثيرات الفتلية. من جهة أخرى، إذا كانت $\beta>1$ فإن ميكانيزم الانهيار هو ميكانيزم انفتالي بحت باتجاه المحور y، ولا يتوقع انخفاض المقاومة بسبب الفتل غير المرن للمنشأة.

من المعادلة (17)، يتشكل ميكانيزم الفتل عندما:

$$\beta = \frac{1}{2}\frac{j_x + \gamma j_y}{\frac{j_x}{2} + |x_R| + \alpha\left(\frac{j_y}{2} + |y_R|\right)} \prec 1 \quad (18)$$

إذن يتشكل ميكانيزم الفتل عندما:

$$|x_R| + \alpha|y_R| > \frac{1}{2} j_y(\gamma - \alpha) \quad (19)$$

بشكل مماثل، عند تحليل الاتجاه الآخر، أي، من أجل القوى V و αV باتجاه المحور x والمحور y، على التوالي، يمكن كتابة معادلة حمولة الانهيار للميكانيزم الفتلي كالتالي:

$$V_T^* = \frac{1}{2}\frac{\frac{1}{2} j_x + j_y}{\alpha\left(\frac{j_x}{2} + |x_R|\right) + \frac{j_y}{2} + |y_R|} \sum_{i=1}^{n} V_{xi}^* = \beta \sum_{i=1}^{n} V_{xi}^* \quad (20)$$

كما سبق، يتشكل ميكانيزم الفتل عندما:

$$\alpha|x_R| + |y_R| > \frac{1}{2} j_x(\gamma - \alpha) \quad (21)$$

تبين المعادلتين (17) و(20) الانخفاض في مقاومة المنشأة نتيجة التأثيرات الفتلية عند حدوث ميكانيزم فتلي. تعطي المعادلتان (19) و(21) شرط تشكل الميكانيزم الفتلي، وبالتالي، الإجراء اللازم لتجنب تشكل هذا الميكانيزم. يمثل الطرف اليساري من المعادلتين (19) و(21) لامركزية النقطة R (مركز المقاومة) باعتبار تأثيرات الاتجاه الثاني (الاتجاه المتعامد مع اتجاه الحركة الأرضية الزلزالية)، أي مقياس النسبة ما بين المتطلبات الزلزالية الفتلية والجانبية. يمثل الطرف الأيمن ذراعاً مزدوجة الفتل متأثرة بإدخالات الاتجاه الزلزالي الثاني وتوزيع المقاومة بين العناصر، أي، مقياس النسبة ما بين السعة الفتلية والجانبية للمنشأة.

لا يمكن للموديل الإنشائي المساعد أن يعطي صورة كاملة عن السلوك غير المرن للمنشأة، لأنها ليست المنشأة الحقيقة، بل موديل مساعد يتم تحليله، لتحديد المظاهر الرئيسة للسلوك غير المرن والحصول على تقدير جيد وأمين حول نسبة انخفاض المقاومة نتيجة الفتل غير المرن. إن الغرض الرئيس من هذا التبسيط هو إعطاء المصمم فكرة مبكرة (في مرحلة التصميم الأولي) عن السلوك غير المرن للجملة الإنشائية المقترحة خلال الاستجابة الزلزالية، وبالتالي تحديد ميكانيزم الانهيار المسيطر (فتلي أم انتقالي). حيث سيؤدي ميكانيزم الانهيار الفتلي إلى تخفيض في مقاومة المنشأة لا يؤخذ بعين الاعتبار أثناء التصميم التقليدي.

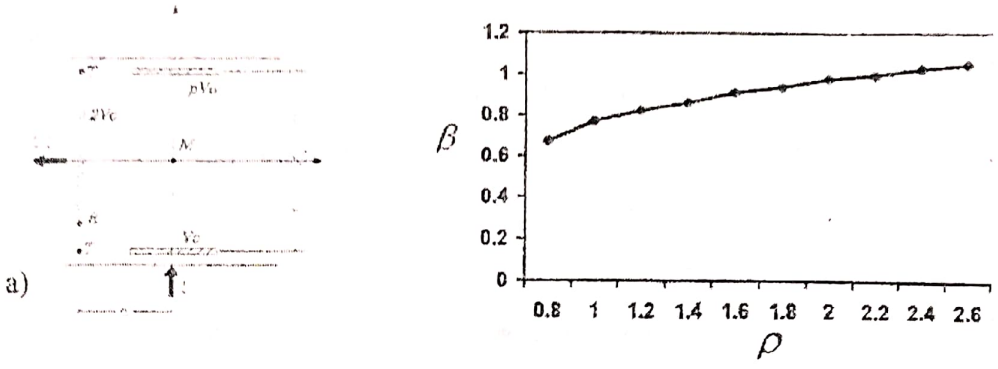
3-2- دراسة الحالات الخاصة:

بشكل مماثل لما ذكر أعلاه، سندرس الفتل غير المرن لعدة حالات خاصة متنوعة، تغطي مجال واسع من أنظمة المنشآت المستخدمة في القطر. هكذا، وبالاستناد إلى هذه الطريقة، سيتم الحصول على دلائل إرشادية واضحة تستعمل خلال التصميم الزلزالي الأولي للمنشأة بغية الأخذ بعين الاعتبار التأثيرات الزلزالية الفتلية غير المرنة أثناء الاستجابة الزلزالية. تنصح الكودات الزلزالية العالمية[21] وبعض الدراسات[17] باختيار $\alpha = 0.3$ في كل الحالات، لتمثل نسبة القوى الجانبية الزلزالية في الاتجاه العمودي على اتجاه الفعل الزلزالي الرئيس (القوة الثانوية). تُوجه هذه القوة الثانوية بالاتجاه الذي يزيد الفتل الناتج عن القوة الزلزالية الرئيسية.

بهدف أتمتة الحساب تم باستخدام الكمبيوتر، وضع برنامج عام بلغة (Visual Basic) على أساس المعادلات (8) حتى (21)، و ذلك للحصول على نسبة انخفاض الماقومة نتيجة الفتل غير المرن للمنشآت، انطلاقاً من المعطيات والاعتبارات التصميمية للكودات العالمية، والمشار إليها أعلاه. لقد تم الحصول على نتائج حساب الحالات المدروسة والأمثلة التطبيقية أدناه، بالاستخدام المباشر لهذا البرنامج.

الحالة الأولى:

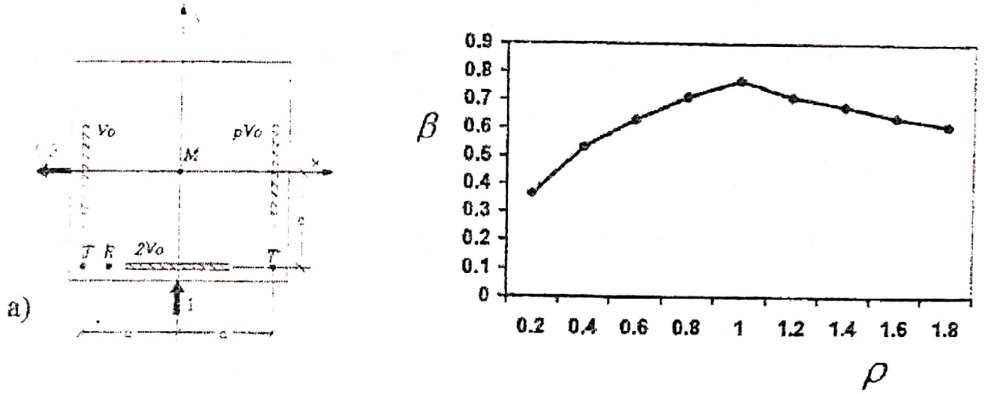
تمثل منشأة بثلاثة عناصر إنشائية ذات نسب مقاومة موضحة في الشكل رقم (5-a)، حيث ρ نسبة المقاومة لأحد العناصر الإنشائية العمودي على الاتجاه الزلزالي الرئيس. يبين الشكل (5-b) نسبة انخفاض مقاومة البناء β نتيجة التأثيرات الفتلية كتابع لنسبة المقاومة ρ. من أجل $\rho<1$، يتشكل الميكانيزم اللدن مع مركز الفتل T، والقوة الثانوية بالاتجاه السالب للمحور x. من أجل $\rho>1$، تتغير إشارة القوة الثانوية بالنسبة للمحور x ويصبح مركز الفتل T'.



الشكل (5) نسبة انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن.

الحالة الثانية:

تمثل منشأة بثلاثة عناصر إنشائية مقاومة ذات نسب موضحة في الشكل رقم (a-5)، حيث ρ نسبة المقاومة لأحد العناصر الإنشائية بالاتجاه الزلزالي الرئيس. يبين الشكل (b-5) نسبة انخفاض مقاومة البناء β نتيجة التأثيرات الفتلية كتابع لنسبة المقاومة ρ. من أجل ρ<1، يتشكل الميكانيزم اللدن مع مركز الفتل T، والقوة الثانوية بالاتجاه السالب للمحور x. من أجل ρ>1، تتغير إشارة القوة الثانوية بالنسبة للمحور x ويصبح مركز الفتل 'T. نلاحظ أنه في هذه الحالة يتشكل ميكانيزم الفتل مهما كانت قيمة ρ، وتزداد نسبة انخفاض المقاومة على الفتل عندما تكون ρ<1 و ρ>1.

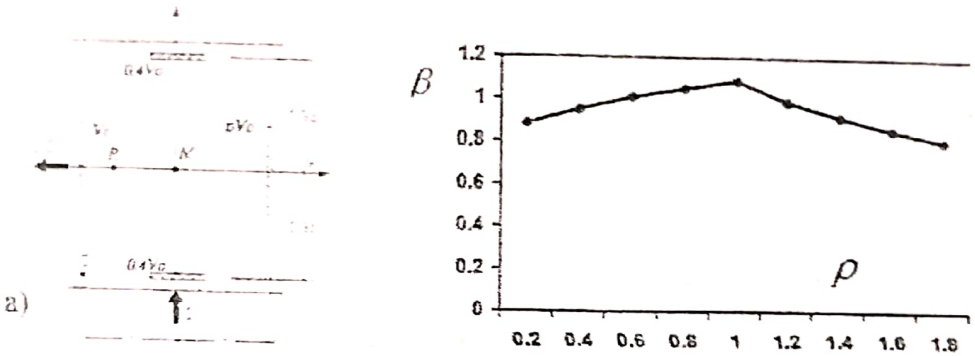


الشكل (5) نسبة انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن.

الحالة الثالثة:

تمثل منشأة بأربعة عناصر إنشائية مقاومة ذات نسب موضحة في الشكل رقم (a-6)، حيث ρ نسبة المقاومة لأحد العناصر الإنشائية بالاتجاه الزلزالي الرئيس. يبين الشكل (b-6)

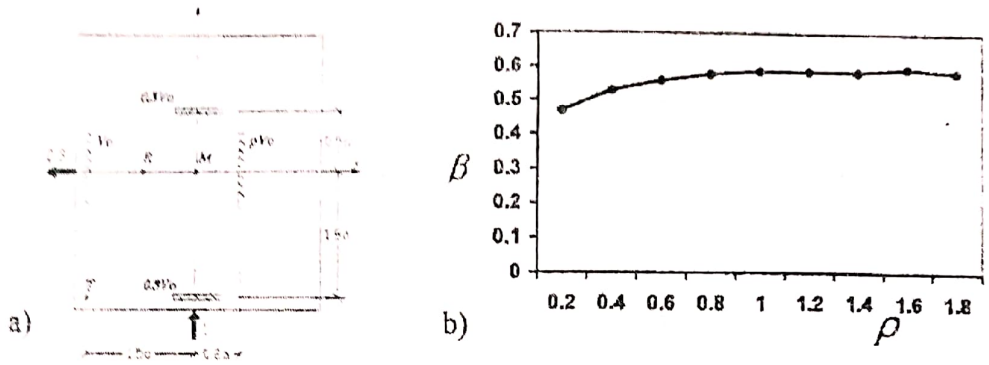
نسبة انخفاض مقاومة البناء β نتيجة التأثيرات الفتلية كتابع لنسبة المقاومة ρ. نلاحظ أنه في هذه الحالة أنه عندما تكون ρ=1 يتشكل ميكانيزم فتل وهي حالة تساوي مقاومة العناصر الإنشائية المتناظرة في كلا الاتجاهين، أيضاً تزداد في هذه الحالة نسبة انخفاض المقاومة على الفتل عندما تكون ρ>1 و ρ<1.



الشكل (6) نسبة انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن.

الحالة الرابعة:

تمثل منشأة مشابهة للحالة السابقة مع تعديل المركز الهندسي للعناصر الإنشائية مقاومة في كلا الاتجاهين، كما هو موضح في الشكل رقم (7-a)، يبين الشكل (7-b) نسبة انخفاض مقاومة البناء β نتيجة التأثيرات الفتلية كتابع لنسبة المقاومة ρ. نلاحظ أن ميكانيزم الفتل ρ كما أن نسبة انخفاض المقاومة β تتغير بنسب صغيرة مع تغير ρ. تبين هذه الحالة أن توقيع العناصر الإنشائية المقاومة بشكل غير متناظر بالنسبة لمركز الكتلة، تسبب انخفاض المقاومة على الفتل مع عدم وجود إمكانية لتحسين الأداء بشكل ملحوظ، مهما جهد المصمم في تعديل مقاومات العناصر الإنشائية.



الشكل (7) نسبة انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن.

نشير هنا، أنه يجب إضافة لامركزية طارئة e_a على إحداثيات مركز المقاومة R في كل اتجاه[17،18] كما سنفعل لاحقاً في الأمثلة المحلولة، وذلك من أجل اعتبار السلوك اللاخطي؛ المركبات الانتقالية الفراغية الناتجة عن الحركة الأرضية الزلزالية؛ والفروقات (الاختلافات) بين قيم وتوزيع الكتلة، الصلابة، ومقاومة الخضوع، التي تستخدم في التحليل والقيم والتوزيعات الحقيقية عندما يحدث الزلزال. يمكن استخدام القيمة $e_a = \pm 0.05L$ (حيث L بعد مسقط البناء العمودي على اتجاه الحركة الأرضية) لحساب اللامركزية الطارئة كما هو محدد في الكودات الأمريكية واعتبارات التصميم[17،15] ريثما تتوفر دراسات متقدمة (مستقبلية). يجب استخدام هذه القيمة بعناية لأن الدراسات الإحصائية القليلة المتوفرة حالياً عن اللامركزية الطارئة تعتمد على الاستجابة الزلزالية المرنة[19] وبالتالي فإنها لا تتضمن تغيراً في مقاومة الخضوع للعناصر.

4- إجراءات التصميم الأولي للسيطرة على الفتل غير المرن للمنشآت:

بالاعتماد على ما تم مناقشته أعلاه، وبهدف السيطرة على مسألة الفتل غير المرن للمنشآت ومعرفة تأثيراته خلال التصميم الأولي للأبنية التي تحقق تقريباً شروط الحالات المدروسة (أبنية بدون تغيرات كبيرة في الشكل) يمكن اقتراح الإجراء التالي:

1- تقدر سعة القص القاعدي الحدية (الخضوع) لكل عنصر إنشائي مقاوم في مخطط البناء الأولي. يكفي لتطبيق الطريقة المقترحة في هذه المقاولة النسبية فقط.

2- يُحسب موقع مركز المقاومة R المتعلق بمركز الكتلة M باستعمال المعادلة (1).

3- تُحسب اللامركزية الطارئة e_a في كل اتجاه.

4- تُحدد قيم الإحداثيات x_R وy_R بإضافة اللامركزية الطارئة في كل اتجاه إلى المسافة المحسوبة بين مركز المقاومة R ومركز الكتلة M.

5- يمكن اختيار العامل α=0.3 للأخذ بعين الاعتبار تأثير القوى الجانبية الزلزالية في الاتجاه العمودي على الفعل الزلزالي الرئيسي[17].

6- يُحسب ذراع مزدوجة الفتل j_x وj_y باستعمال المعادلة (9) والنسبة γ باستعمال المعادلة (16).

7- يُحدد من المعادلة (18) نسبة انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن لكل اتجاه.

إذا كانت β>1.0 لا يتوقع انخفاض في مقاومة البناء نتيجة الفتل غير المرن. إذا كانت β<1.0 يجب تعديل المخطط الإنشائي والمقاومات لتجنب الزيادة في إزاحات البناء والتناقص في مقاومته (تشكل ميكانيزم فتل) خلال التصميم الزلزالي الأولي للبناء[13].

5- أمثلة تطبيقية:

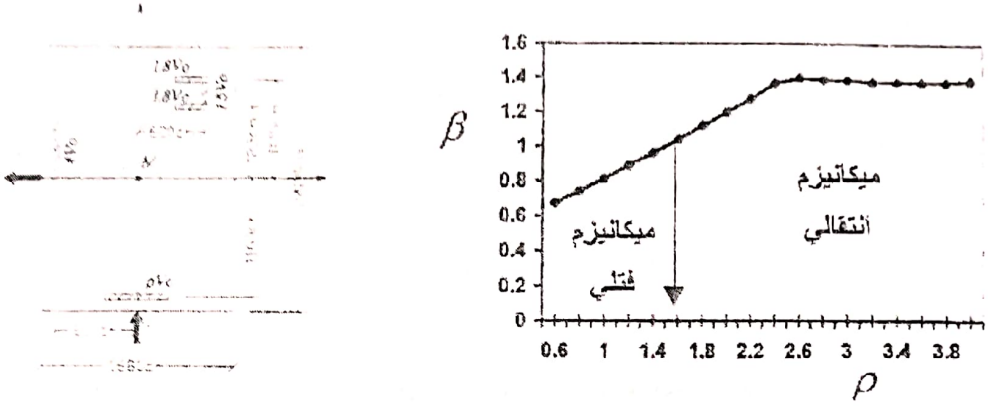
توضح الأمثلة التالية كيفية استعمال المفاهيم السابقة في التصميم الزلزالي الأولي لتجنب حدوث استجابة فتلية غير مرنة.

المسألة التصميمية (1):

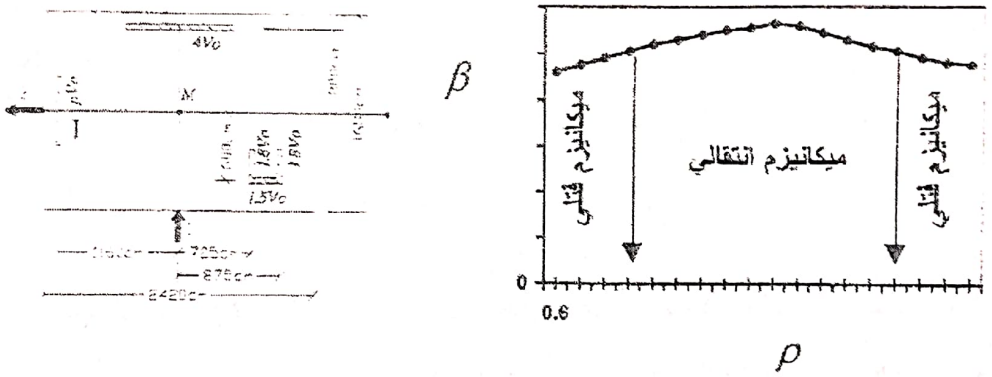
يبين الشكلان (8) و(9) مخطط بناء بأبعاد 24.2×16.8m، مشيداً في مدينة اللاذقية. تتضمن الجملة الإنشائية المقاومة للزلازل، نواة بعيدة عن مركز الكتلة وجداري قص جانبيين. المطلوب تحديد النسبة ρ لتجنب تشكل الميكانيزم الفتلي خلال الاستجابة الزلزالية للبناء.

الحل: نفترض لامركزية طارئة مقدارها $e_\alpha = 0.05\times16.8m = 0.84m$ في الاتجاه القصير للبناء، ولامركزية طارئة مقدارها $e_\alpha = 0.05\times24.2m = 1.21m$ في الاتجاه الطويل للبناء[17،18]. بفرض $\alpha = 0.30$ لأغراض تصميمية[23].

يلاحظ من الشكل رقم (8)، أنه عند تطبيق القوة الزلزالية بالاتجاه القصير يتشكل ميكانيزم الفتل عندما ρ<1.5، أي أن نسبة المقاومة للجدار I تلعب دور رئيس في تحديد ميكانيزم الانهيار للحالة المدروسة (فتلي عندما ρ<1.5، وانتقالي عندما $\rho\geq1.5$).



الشكل (8): انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن تحت تأثير القوى زلزالية بالاتجاه القصير.



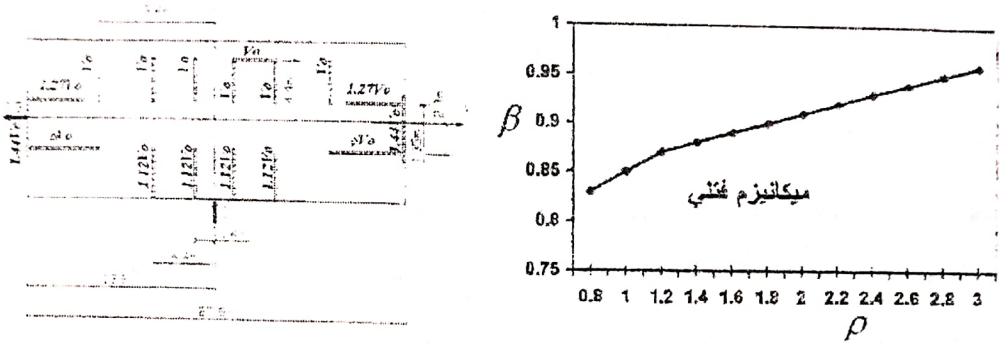
الشكل (9): انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن تحت تأثير القوى زلزالية بالاتجاه الطويل.

يلاحظ من الشكل رقم (9)، أنه عند تطبيق القوة الزلزالية بالاتجاه الطويل يتشكل ميكانيزم الفتل عندما $\rho<1.2$ و$\rho>3.4$، أي أن نسبة المقاومة للجدار I تؤدي لتشكل ميكانيزم انفتالي عندما $1.2\leq\rho\leq3.4$ وميكانيزم فتلي خارج هذا المجال. هكذا لتجنب تشكل ميكانيزم انهيار فتلي للحالة المدروسة تحت تأثير قوى زلزالية بالاتجاه القصير أو الطويل يجب أن تكون المقاومة للجدار I ضمن المجال $1.5\leq\rho\leq3.4$.

المسألة التصميمية (2):

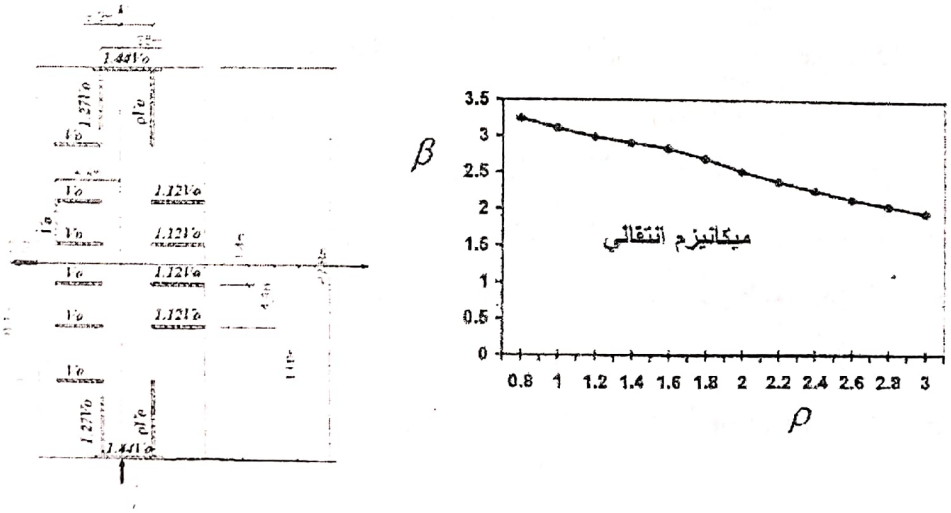
يبين الشكلان (10) و(11) مخطط بناء بأبعاد 27.8×11.7m، مشيداً في مدينة اللاذقية. تتضمن الجملة الإنشائية المقاومة للزلازل ثلاثة نوى وثمانية جدران قص، بمقاومات خضوع نسبية موضحة في الشكلين المذكورين. المطلوب تحديد النسبة ρ لتجنب تشكل الميكانيزم الفتلي خلال الاستجابة الزلزالية للبناء.

الحل: نفترض لامركزية طارئة مقدارها $e_\alpha = 0.05\times11.7m = 0.59m$ في الاتجاه القصير للبناء، ولامركزية طارئة مقدارها $e_\alpha = 0.05\times27.8m = 1.39m$ في الاتجاه الطويل للبناء[17،18]. بفرض $\alpha = 0.30$ لأغراض تصميمية[23].



الشكل (10): انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن تحت تأثير القوى زلزالية بالاتجاه القصير.

يلاحظ من الشكل رقم (10)، أنه عند تطبيق القوة الزلزالية بالاتجاه الطويل يتشكل ميكانيزم الفتل من أجل جميع قيم ρ المعتمدة في دراسة الحالة ورسم المخطط المرفق. يصبح ميكانيزم الانهيار انتقالياً من أجل $\rho>4.2$، وهي قيم كبيرة جداً مقارنة بأبعاد البناء وأبعاد عناصر الجملة الإنشائية، علماً أن القيمة المنفذة في الواقع هي $\rho = 1.64$.



الشكل (11): انخفاض المقاومة الإنشائية β نتيجة الفتل غير المرن تحت تأثير القوى زلزالية بالاتجاه الطويل.

يلاحظ من الشكل رقم (11)، أنه عند تطبيق القوة الزلزالية بالاتجاه القصير يتشكل ميكانيزم انتقالي لكل قيم ρ المدروسة، مما يعني أن الجملة الإنشائية للبناء تعتبر آمنة تحت تأثير القوى الزلزالية بالاتجاه القصير. يعود ذلك إلى وجود عدد كبير من جدران القص بالاتجاه العمودي على اتجاه القوى الزلزالية. يحتاج البناء بمجمل الاتجاهين الرئيسيين لإعادة النظر في جملته الإنشائية.

6- النتائج:

تبين الحالات المدروسة أعلاه أنه إذا أردنا تخفيض تأثير الفتل غير المرن، فإنه يجب تخفيض اللامركزية (x_R, y_R) و/أو زيادة ذراع مزدوجة الفتل (j_x, j_y). تعتمد الإحداثيات (x_R, y_R) على موقع مركز المقاومة R، بالعلاقة مع مركز الكتلة M. إذن، يجب على المصمم أن يحاول توقيع النقطة R أقرب ما يمكن إلى النقطة M. تزداد القيم (j_x, j_y) بزيادة عدم التقرير الفتلي وتوقيع العناصر المقاومة أبعد ما يمكن عن مركز المقاومة R. نحصل من الحالات المدروسة على الاستنتاجات التالية:

1- تتعلق اللامركزية باتجاه المحور x (x_R) بشكل رئيسي بذراع مزدوجة الفتل باتجاه المحور y (j_y) كما هو موضع في المعادلة (19). إذن، يتم التحكم بالفتل غير المرن أساساً بواسطة العناصر الإنشائية المقاومة العمودية على اتجاه الفعل الزلزالي الرئيسي. يحدث هذا لأنه يتم استهلاك العناصر الإنشائية المقاومة المرافقة للفعل الزلزالي الرئيسي من قبل القوى الزلزالية المتفقة معها بالاتجاه.

2- بسبب أن العناصر الإنشائية المقاومة العمودية على الاتجاه الرئيسي للزلزالي تسيطر على الفتل غير المرن، فإن الزيادة في نسبة الفعل الزلزالي للاتجاه الثاني (المتعامد) α تُخفض من سعة (مقدرة) الفتل، كما هو موضع في المعادلتين (17) و(20).

3- لتجنب تشكل الميكانيزم الفتلي، يجب أن تقترب النسبة بين المقاومة باتجاه المحور x والمقاومة باتجاه المحور y من الواحد ما أمكن، كما هو موضع في المعادلتين (19) و(21). من الصعب جداً تجن تشكل الميكانيزم الفتلي إذا كانت γ أو 1/γ أقرب ما يمكن إلى قيمة α لأنه لن تبقى مقاومة للتحكم بالفتل المطبق بعد استهلاكها بالفعل المباشر للقوى الزلزالية (قوى القص).

4- إذا كانت $j_x = 0$ أو $j_y = 0$ أي، عندما يكون هناك عنصر إنشائي مقاوم واحد فقط، عمودي على اتجاه الفعل الزلزالي الرئيس، تكون $\beta<1$ ويتشكل ميكانيزم فتلي.

REFERENCES المراجع

[1]- الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة، 1996.

[2]- Sedarat, H., and Bertero, V.V., "Effects of torsion on the nonlinear seismic response of multistory structures". Proc., 4th U.S. Nat Conference On Earthquake Engineering 1990, Vol.2, Earthquake Engineering Inst. Oakland, Calif., pp.421-429.

[3]- Mile, R., "Evaluation of performance of concrete buildings damaged by the September 19.1985 Mexico earthquake". The Mexico Earthquke 1985-Proc., International Conference, Cassaro M. and Romero E. M., ASCE, New York, N.Y., 1986, pp.308-327.

[4]- Mitchell, D., Adams, J., De Vall, R., Lo. R., and Weicert, D., "Lessons learned from the 1985 Mexican earthquake". Canadian Journal of Civil Engineering, Ottawa, Canada, 1986, Vol.13, No.5, pp.535-557.

[5]- Wood, S., Stark, R., and Greer, S., "Collapse of eight-story RC Building during 1985 Chile earthquake". ASCE Journal of Structural Engineering, 1991, Vol.117, No.2,pp.600-619.

[6]- Erdik, M.O., "Torsional effect in dynamically excited structure", Ph.D. thesis. Eept. Of Civil engineering, Rice. Univ., Houston, Tex., 1975.

[7]- Irvine, H.M., and Kountouris, G.E., "Peak ductility demands in simple torsionally unbalanced building models subjected to earthquake ground exciatation". Proc., 7th Word Conference on Earthquake Engineering. Int. Association of Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 1981, Vol.4, pp.117-120.

[8]- Tso, W.K., and Sadek, A.W., "Inelastic seismic response of simple eccentric structures". Earthquake Engineering Structural Dynamics, 1985, Vol.13, No.2, pp.255-269.

[9]- Bozorgnia, y., and Tso, W.K., "Inelastic earthquake response of asymmetric structures". ASCE Journal of Structural Engineering, 1986, Vol.112, No.2, pp.338-399.

[10]- Esteva, L., "Earthquake engineering research and practice in Mexico after the 1985 earthquakes" Bull. New Zealand Nat. Soc. For Earthquake Engineering, 1987, Vol.20, No.3, pp.159-200.

[11]- Sadek, A.W., and Tso, W.k., "Strength eccentricity concept for inelastic analysis of asymmetric structures". Proc., 9th World conf. on Earthquake Engineering, 1990, Vol.2, Earthquake Engineering Inst., Oakland, Calif, pp.421-429.

[12]- Tso, W.K., and Hongshan, Y., "Additional seismic inelastic deformation caused by structural asymmetry". Earthquake Engineering Structural Dynamics, 1990, Vol.19, No.2, pp.243-258.

[13]- Bertero, R., and Bertero, V. "Tell reinforced concrete buildings: conceptual earthquake-resistant design methodology". Rep. No. UCB/EERC-92/16. 1992, Earthquake Engineering Res. Ctr., Univ. of Calif., Berkeley, Calif.

[14]- Aktan, A., and Nelson G. "Problems in predicting seismic responses of RC buildings". ASCE Journal of Structural Engineering, 1988, Vol.114, No.9 pp.2036-2056.

[15]- Oliva, M., and clough, R., "Biaxial seismic response of R/C frames". ASCE Journal of Structural Engineering, 1987, Vol.113, No.6, pp. 1264-1281.

[16]- Neal, B.G., "The platic methods of structural analysis". 1977, 3rd Ed, Chapman and Hall, Ltd., London, England.

[17]- Clough, R.W., and Penzien, J., "Dynamics of structures". 1992, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, USA.

[18]- "Recommended lateral Force requirements and tentative commentary". 1990; Structural Engineering Association of Calif., San Francisco, Calif.

[19]- "Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings". 1978, Publ. Atc3-06, Appl. Tecnol. Council, Palo Alto, Calif.

[20]- De la Llera and Chopra "Evalluation of code accidental-torsion provisions from buildings records". ASCE Journal of Structural Engineering, 1994, Vol.120, No.2, pp.597-616.

[21]- Paulay, T., Priestley, M.J.N., "Seismic design of reinforce concrete and masonry buildings", 1992, John Wiley & Sons. Inc.

[22]- Ambrose, J., Vergun D., "Simplified building design for wind and earthquake forces", 1995, 353 p., John Wiley & Sons, Inc.

[23]- Paz, M., "International Handbook of earthquake engineering codes, programs, and examples", 1994, 545p., Chapman & Hall, Inc.