Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 39, No 6, pp.1281-1299, November 2011

SEISMIC ISOLATION SYSTEMS FOR REDUCING THE DYNAMIC RESPONSE OF THE ELEVATED WATER TANKS

Issam Nasser
Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, lattakia, Syria.
Email : i.nasser90@yahoo.com .

(Received August 17, 2011 Accepted September 15, 2011)

This research discusses the seismic response of the elevated water tanks which is represented by the base shear forces, displacements and bending moment values, and also studying the dynamic characteristic for this type of especial structures, such as the period and frequencies of vibration , all these are done by dynamic analysis for 3-D mathematical models according to response spectrum ,with considering the fluid-structure interactions by representing this fluid with spring-two masses equivalent system: impulsive and convective masses .This analysis has been done by SAP 2000 program . This research involves studying the effect of friction pendulum system (FPS) in dissipating the vibration energy caused by seismic effects on the elevated tanks, and the influence to the response and dynamic specifications values. Also, in this paper the seismic behavior of these elevated tanks which are supplied by tuned mass damper has been evaluated.

A reinforced concrete- elevated water tank has been analyzed and the dynamic analysis results of these seismic isolated tanks showed that the displacements, base shear forces and bending moment generally decreased

KEYWORDS : *elevated water tanks; Fluid -structure interaction; passive control; Seismic isolation; Friction pendulum system; tuned mass damper*

فاعلية نظامي العزل الزلزالي : البندول الاحتكاكي (FPS) و مخمّد الكتلة المنسجمة (TMD) في تخفيض قيم الاستجابة الديناميكية لخزانات المياه العالية

الدكتور المهندس عصام ناصر

أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.
Email : i.nasser90@yahoo.com

الملخص

يتناول البحث مسألة الاستجابة الزلزالية لخزانات المياه العالية المتمثلة بقيم قوى القص عند مستوى القاعدة ، الإزاحات و عزوم الانحناء ، و كذلك دراسة الخصائص الديناميكية لهذا النوع من المنشآت الخاصة كالزمن الدوري و تردد الاهتزاز وذلك بطريقة التحليل الديناميكي لنماذجها الرياضية الثلاثية الأبعاد و فق طيف استجابة . مع أخذ التفاعل المتبادل بين السائل المخزن و المنشأ ، بتمثيل هذا السائل بنموذج رياضي مكون من زنبرك و كتلتين مكافئتين: دفعية و حملية. هذا التحليل تم بمساعدة البرنامج الهندسي SAP 2000. و يتضمن البحث دراسة فاعلية إحدى أنظمة العزل عند مستوي القاعدة المتمثل بعازل البندول الاحتكاكي (FPS) في تبديد طاقة الاهتزاز

الناجمة عن التأثيرات الزلزالية على منشآت الخزانات العالية و بالتالي بيان مدى انعكاس ذلك على قيم الخصائص الديناميكية لهذه المنشآت المعزولة قاعدياً و قيم الاستجابة الزلزالية. كما تطرق البحث إلى تقيم السلوك الزلزالي لهذه الخزانات المزودة بنظام مخمّد الكتلة المنسجمة (TMD) و أثر ذلك على قيم الاستجابة الديناميكية و قيم الترددات وأشكال الاهتزاز . قدم البحث مثالاً تطبيقيا على خزان ماء عالي من الخرسانة المسلحة ، و قد أظهرت نتائج التحليل الديناميكي لهذا للخزان المعزول زلزالياً تناقصاً في قيم الإزاحات ، القص عند مستوي القاعدة و عزوم الانحناء .

الكلمات المفتاحية : خزانات المياه العالية ، تفاعل سائل – منشأ ، التحكم السلبي ، العزل الزلزالي ، عازل البندول الاحتكاكي ، مخمّد الكتلة المنسجمة .

- مقدمة:

تعتبر خزانات المياه العالية من المنشآت الحيوية الهامة في الحياة العملية نظراً لكونها أحد مصادر الإمداد المائي الذي يعتبر أساسيا للتزود بمياه الشرب ولإطفاء الحرائق التي يمكن أن تنشب أثناء وقوع الزلازل و التي قد تسبب خسائر بشرية و مادية كبيرتين ، إضافة إلى استخدامها في تخزين المواد السائلة كالنفط و الغاز و المواد الصلبة الأخرى . لذلك ينبغي أن تبقى هذه الخزانات في نطاق الخدمة حتى ما بعد حدوث الزلزال لضمان التزود بالمياه و بالمواد الأخرى في المناطق المنكوبة .

كما تمتلك هذه المنشآت خاصية مميزة من حيث سلوكها الإنشائي تحت تأثير أفعال الزلازل و قدرة تبديد طاقة أدنى من الأبنية التقليدية نظراً لاحتوائها على مواد سائلة حيث تخضع هذه المنشآت لقوى هيدروديناميكية أثناء التحريض الزلزالي الجانبي الأمر الذي قد يصعب معه التنبؤ بسلوكها الفعلي أثناء الحدث الزلزالي إضافة إلى ذلك كيفية تقدير كتلة السائل الفعّالة ، التي ينبغي أخذها بعين الاعتبار أثناء التحليل الديناميكي . و أيضاً ماتملكه جملها الإنشائية من مواصفات هندسية مثل عدم التناظر من حيث توزع الكتل و الصلابات.

من هنا جاءت فكرة دراسة هذا النوع من المنشآت الخاصة حيث أوصت معظم الكودات الزلزالية الخاصة بها باتخاذ احتياطات و تدابير أكثر صرامة لمقاومة القوى الزلزالية من حالة الأبنية و بنمذجة القوى الهيدروديناميكية أثناء التحليل [**1**] بهدف الحفاظ على أمانها و استقرارها بمعنى أن تبقى بمناءً عن المخاطر الزلزالية المتوقعة الحدوث في المنطقة ، و هذا ممكن بفهم السلوك الزلزالي الفعلي و تعيين مقادير الاستجابة الديناميكية لها أثناء الحدث الزلزالي . و للتقليل من قيم الاستجابة هذه ستعتمد الدراسة على خاصية نظام العزل عند مستوي القاعدة باستخدام عازل البندول الاحتكاكي (**FPS**) الذي يقوم على مبدأ اعتراض طاقة الزلزال قبل أن تقوم بصدم قاعدة الخزان و امتصاص جزءً كبيراً منها و بالتالي الحد من كمية الطاقة المتسربة إلى المنشأ . كما ستتم المقارنة مع فاعلية نظام مخمّد الكتلة المنسجمة (**TMD**) في تبديد الطاقة المنتقلة إلى خزانات المياه العالية عن طريق حدوث ظاهرة الرنين في الكتلة بدلاً من حدوثها في المنشأ .

- أهمية البحث و أهدافه

تكمن أهمية البحث في بيان السلوك الفعلي لخزانات المياه العالية و في تقدير الكتلة المساهمة الفعالة للسائل المخزن فيها أثناء الحدث الزلزالي ، وبإجراء التحليل الديناميكي لنماذجها الإنشائية الثلاثية الأبعاد بمساعدة البرنامج الهندسي **SAP 2000** [**2**] ، وفق طيف استجابة سيتم تصميمه اعتماداً على المعاملات الزلزالية و نموذج مقطع التربة الخاصة بموقع المنشأ المدروس . وذلك قبل استخدام نظام العزل عند مستوي القاعدة (**FPS**) و بعده من جهة ، و دراسة مقادير الاستجابة الديناميكية لهذه النماذج عند استخدام مخمّد الكتلة المنسجمة (**TMD**) .

و يهدف البحث إلى بيان مدى فاعلية عازل البندول الاحتكاكي (**FPS**) في امتصاص طاقة الاهتزاز المتولدة بفعل الزلازل و كذلك قدرة مخمّد الكتلة المنسجمة (**TMD**) على تبديد هذه الطاقة ضمن المنشأ و ما مدى انعكاس ذلك على تخفيض قيم الاستجابة الديناميكية للخزانات العالية المتمثلة بالقص عند مستوي القاعدة ، الإزاحات ، وعزوم الانحناء .

- طريقة البحث

سنستعرض فيما يلي كيفية اختيار النموذج الرياضي لخزانات المياه العالية بما فيها تقدير كتلة السائل عند إجراء التحليل الديناميكي لهذا النوع من المنشآت الخاصة تحت الأحمال الزلزالية . كما سنوضح مبدأ العزل عند مستوي القاعدة باستخدام عازل البندول الاحتكاكي والعلاقات الرياضية الخاصة بتصميمه كما سنتطرق إلى مفهوم مخمّد الكتلة المنسجمة وخصائصه و مجال استخدامه .

1 – التحليل الديناميكي و النموذج الرياضي للخزانات العالية

سنعتمد في التحليل الديناميكي للخزانات العالية على البرنامج الهندسي **SAP 2000** و ذلك من خلال النموذج الرياضي الفراغي لها قبل عزلها زلزالياً بنظام **FPS** و بعده عن طريق الأمر **Isolator2** المخزن بالبرنامج والذي يمثل نموذج عزل احتكاك بندولي ثنائي المحور يربط بين خواص الاحتكاك من أجل تشوهات القص و صلابة الانزلاق المرتبطة باتجاهات القص بسبب نصف قطر البندول للسطوح المنزلقة ، و خواص الصلابة الفعّالة الخطية . يستند نموذج الاحتكاك على السلوك الهستيري (hysteretic) و ينصح به لنمذجة قواعد العزل حيث تتناسب قوى الاحتكاك و قوى البندول مباشرة مع قوة الضغط المحورية في العنصر و لا يتحمل العنصر قوى شد محورية . و كذلك عند عزل الخزان بنظام **TMD** الذي يقوم على إضافة كتلة إلى النموذج الرياضي في أعلى الخزان بواسطة عنصر له صلابة معلومة. سنجري الدراسة لحالة الخزان فارغ ومملؤ مع أخذ تفاعل السائل و المنشأ بعين الاعتبار حيث سيتم تمثيل كتلة السائل استناداً إلى المراجع [**3 , 4**] ، هذا التحليل سيتم إنجازه و فقاً لطيف الاستجابة الوارد في الملحق الثاني للكود العربي السوري و الموافق لطيف الكود الأمريكي **ASCE 7** [**5**] الخاص بالتصميم الزلزالي للمنشآت بما فيها الخزانات العالية والذي سنقوم بتصميمه اعتماداً على المعاملات الزلزالية و نموذج مقطع تربة التأسيس الخاصة بالمنطقة . فكما هو معلوم إن التحليل وفق طيف الاستجابة يبحث عن قيم الاستجابة العظمى المتوقعة من حل معادلات التوازن الديناميكي التالية الخاصة بحركة المنشأ الخاضع لحركة أرضية :

$$[M]\{\ddot{u}\}(t)+[C]\{\dot{u}\}(t)+[K]\{u\}(t)=[M]\{\ddot{y}_g\}(t) \qquad (1)$$

حيث : **[M]** ، **[C]** ، **[K]**- مصفوفات الكتلة ، التخامد و الصلابة للمنشأ المدروس

$\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ ، $\{\ddot{u}\}$ – التسارع ، السرعة و الانتقال بالنسبة للأرض

$\{\ddot{y}_g\}$ – شعاع تسارع الحركة الأرضية

سنعتمد التحليل الديناميكي وفق أشعة **Ritz vector** نظراً لدقة النتائج التي تعطيها مقارنة مع التحليل وفق القيم الذاتية ، و سنعتمد معامل تخامد قدره $\alpha = 5\%$ من التخامد الحرج .

عندما يتعرض الخزان الحاوي على سائل إلى هزة أرضية بفعل الزلزال فإن هذا السائل يولد ضغطاً هيدروديناميكياً دفعياً (**Impulsive**) و حملياً (**Convective**) على جدران الخزان بالإضافة إلى الضغط الهيدروستاتيكي [**4 , 5 , 6**].

المركبة الدفعية تتمثل بكتلة السائل في المنطقة السفلية من الخزان التي تنتقل بانسجام مع منشأة الخزان عند تردد قصير نسبياً (أقل من **1** ثانية) و المركبة الحملية تساهم بها كتلة السائل في المنطقة العلوية التي تتعرض لحركة اضطرابية بتردد اهتزاز يمكن أن يزيد على **10** ثانية [**6**]

يقترح الكود الزلزالي الهندي أن يتم تمثيل الخزانات العالية كجملة بدرجة حرية واحدة بمعنى آخر جملة بكتلة واحدة عند التحليل ،حيث يعتبر أن كتلة السائل الكلية تساهم في النمط الدفعي للاهتزاز (**impulsive mode**) و تنتقل مع جدار الحوض [**7**] . لكن هذا الافتراض قد يكون منطقياً لأجل أحواض الخزانات الطويلة والنحيفة التي لها نسبة الارتفاع إلى نصف القطر تزيد عن أربعة. أيضاً ينص **ACI 371R -98** [**8**] على أن يتم استخدام نموذج ذات كتلة مجمعة و ذلك عندما تشكل حمولة الماء (W_S) **80%** أو أكثر من حمولة الجاذبية الكلية (W_G) ، التي تتضمن الحمولة الميتة الكلية فوق القاعدة، حمولة الماء و **25%** من الحمولة الحية على أرضية الخزان . لأجل هذا النموذج تحدد الصلابة الجانبية على الانحناء للهيكل الحامل (k_S) من سهم الهيكل الخرسانة الحامل الممثل كعمود كابولي [**3 , 8**] :

$$k_S = \frac{3EI_C}{L_{CG}^3} \qquad (2)$$

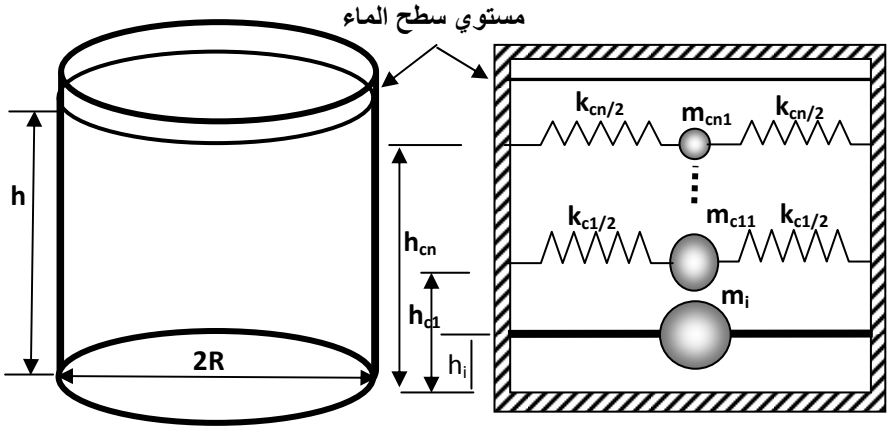
حيث : $\mathbf{L_{CG}}$ - ارتفاع المركز الوسطي للماء المخزن عن القاعدة
$\mathbf{E}$ و $\mathbf{I_C}$ – معامل مرونة المادة و عزم قصور المقطع العرضي حول المحور الوسطي.
الزمن الدوري الأساسي للاهتزاز $\mathbf{T}$ ينبغي تقييمه في حالة الخزانات العالية و فق الصيغة الآتية [**4, 8**] :

$$\mathbf{T = 2\pi \sqrt{\frac{W_L}{g\, k_s}}} \qquad (3)$$

$\mathbf{W_L}$ – الكتلة المجمعة لوزن المنشأ و التي تتكون و فقاً لـ **ACI 371R** من : الوزن الذاتي للحوض – **66%** من الوزن الذاتي المنشأ الخرساني الحامل و وزن الماء ، $\mathbf{g}$ – تسارع الجاذبية الأرضية.

2- تفاعل السائل مع المنشأ

يمكن نمذجة التفاعل المتبادل بين السائل والمنشأ بمقاربات مختلفة [**4**] منها :
الكتلة المضافة (added mass approach) حيث تتم إضافة الكتلة المكافئة للسائل إلى كتلة المنشأ عند السطح البيني بين السائل و المنشأ و يفترض هنا أن الكتلة المضافة تهتز بشكل متزامن مع المنشأ لذلك يتم تعديل مصفوفة الكتلة للمنشأ فقط بينما تبقى مصفوفتي الصلابة و التخامد له على حاليهما دون تغيير ، نموذج عنصر محدد (FEM) [**9**] مقاربة لاغرانج أويلر (Eulerian approach-Lagrangian) أو بطرق تحليل مبسطة كطريقة الكود الأوروبي - 8 [**10**] . حيث تم تقييم و مقارنة نتائج هذه الطرق في المرجع [**3**] .
يقترح العديد من المراجع و التي منها [**3 , 10**] أنه يمكن تمثيل السلوك الديناميكي للسائل بشكل تقريبي بنموذج مكون من كتلة دفعية $\mathbf{m_i}$ (Impulsive mass) تتصل بشكل صلب مع المنشأ وكتل حملية $\mathbf{m_c}$ (Convective masses) مكافئة تتصل بزنبرك كما هو وارد بالشكل (1) .
كما تشير هذه المراجع إلى إمكانية استخدام الكتلة الحملية الأولى فقط لأجل التصميم العملي لهذه الخزانات و بذلك يصبح النموذج الرياضي المعبر عن هذا السلوك مكون من كتلتين فقط : كتلة السائل الدفعية و كتلته الحملية حيث يفترض أن هاتين الكتلتين غير مترابطتين عند تقييم القوى الزلزالية . العلاقات الخاصة بحساب هاتين الكتلتين المكافئتين ، مكان توضعهما و صلابة الزنبرك الذي يربط الكتلة الحملية بجدار حوض الخزان هي [**11 , 3, 10**] :



الشكل (1) – تمثيل خزانات المياه الأسطوانية بجملة كتلة وزنبرك

- كتلة السائل الدفعية $\mathbf{m_i}$:

$$\mathbf{m_i = m_w \frac{\tanh\left(1.74\, R/h\right)}{\left(1.74\, R/h\right)}} \qquad (4)$$

- كتلة السائل الحملية mc :

$$\mathbf{m_c = m_w \cdot 0.318\ \frac{R}{h}\ \tanh\left(1.84\frac{h}{R}\right)} \qquad (5)$$

- صلابة الزنبرك $\mathbf{K_C}$ الذي يصل كتلة السائل الحملية بجدار الخزان :

$$\mathbf{k_c = m_c\ \frac{g}{R}\ 1.84 \tanh \frac{1.84h}{R}} \qquad (6)$$

- منسوب توضع الكتلة الحملية عن أرضية الخزان hc :

$$\mathbf{h_c = \left[1 - \frac{Cosh(1.84h/R) - 1}{(1.84h/R)Sinh(1.84h/R)}\right]h} \qquad (7)$$

- منسوب توضع الكتلة الدفعية عن أرضية الخزان hi :

$$\mathbf{h_i = \frac{3}{8}h} \qquad (8)$$

في هذه العلاقات :

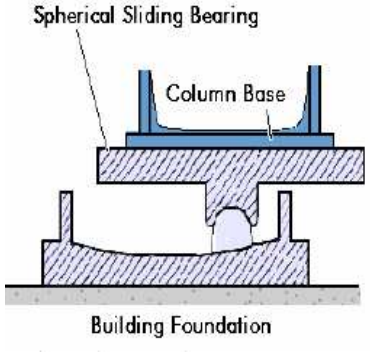
$\mathbf{m_w}$ - الكتلة الكلية للسائل المخزن في الحوض ، **R** – نصف قطر حوض الخزان

h – ارتفاع الشريحة المائية في الخزان ، **g** – تسارع الجاذبية الأرضية

3- عازل البندول الاحتكاكي: (FPS)

يتألف عازل البندول الاحتكاكي من شريحة مغطاة بالتفلون (PTFE) منزلقة على سطح كروي من المعدن المصقول كما في الشكل (2) .

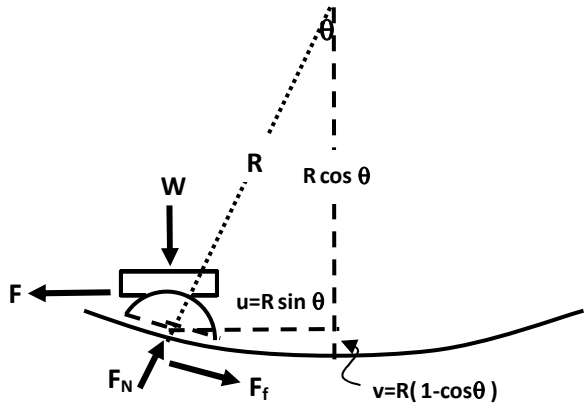
تتميز مساند هذا العازل بخصائص متعددة جعلته يلبي متطلبات العزل لمختلف الأبنية و المنشآت الخاصة [**12**] نذكر منها : قيم دور الاهتزاز لهذا العازل تتراوح مابين (**1 → 5 Sec**) ، قدرة تحمل الحمولات الشاقولية التي تصل إلى (**133440 KN**) ، الانتقال الأفقي المسموح لهذا العازل (**60 inch**)، قيم معامل الاحتكاك له تتراوح من (**3% → 20%**) و كذلك نسبة تخامد هذا العازل تقدر بـ (**10% →40%**) .



(a)- عازل البندول الاحتكاكي **(b)** - مقطع في العازل

الشكل (2) – عازل البندول الاحتكاكي

تتولد قوة الإرجاع النظام العزل هذا من خلال الانتقال على السطح الكروي ، و يتم تبديد الطاقة عن طريق الاحتكاك . تتكون القوة المسببة لانتقال المسند من : قوة الإرجاع $\mathbf{F_r}$ و قوة الاحتكاك $\mathbf{F_f}$ كما هو موضح بالشكل
(3) الذي يمثل مخطط الجسم الطليق لـ **(FPS).**



الشكل (3) : مخطط الجسم الطليق لعازل البندول الاحتكاكي

اعتماداً على مبدأ التوازن نجد أن القوة الأفقية الجانبية **F** تساوي :

$$\mathbf{F = F_r + F_f} \qquad \mathbf{(9)}$$

من الشكل (3) نجد أن هذه القوة تساوي :

$$\mathbf{F = W \tan\theta + \frac{F_f}{\cos\theta}} \qquad (10)$$

حيث : **W** - الوزن المنقول عبر المسند
يتم تصميم عازل **FPS** بشكل عام لأجل انتقال $u < 0.2\,R$ حيث θ تكون صغيرة [**13** ، **15**] وذلك بهدف تخفيض خطأ حالة التمثيل اللاخطي و لتخفيض القوى المتولدة في العناصر الإنشائية الحاملة للمنشأ في هذه الحالة:

$$\mathbf{\sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + ... \approx \theta\ ,}$$
$$\mathbf{\cos\theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + ... \approx 1} \qquad (11)$$

ولدينا :

$$\mathbf{\tan\theta = \theta = \frac{u}{R\cos\theta} \approx \frac{u}{R}} \qquad (12)$$

$$\mathbf{F_N = \frac{W}{\cos\theta} \approx W} \qquad (13)$$

$\mathbf{u = R\ Sin\theta}$ - مركبة الانتقال الأفقية ، $\mathbf{v = R\ (1 - Cos\ \theta)}$ مركبة الانتقال الشاقولية

تعطى قوة الاحتكاك $\mathbf{F_f}$ بالصيغة التالية [**14**] :

$$\mathbf{F_f = \mu \cdot F_N\, sgn(\dot{u})} \qquad (14)$$

في هذه الصيغة :

μ - معامل الاحتكاك ، F_N – القوة الناظمية ، $\dot{u}$ - سرعة الحركة ،

sgn – تابع Signum و يأخذ القيمتين +1 و -1 تبعاً لقيمة السرعة هل هي موجبة أم سالبة على الترتيب

القوة الأفقية الكلية في العازل بعد تبديل (12) ، (13) و (14) في (10) تصبح [**13**] :

$$\mathbf{F = \frac{W}{R}u + \mu\ W \cdot sgn(\dot{u})} \qquad (15)$$

إن قوة الاحتكاك المتولدة على سطح الانزلاق تتعلق بـ : القوة المركزية ، قوة ضغط المسند ، اتجاه و قيمة سرعة الانزلاق و خصائص سطح الانزلاق . تمت دراسة خصائص الاحتكاك للتفلون مع السطح الفولاذي المصقول من قبل العالم Constantinou (1990) حيث اقترح العلاقة التالية لتحديد قيمة معامل الاحتكاك الديناميكي [**14**] :

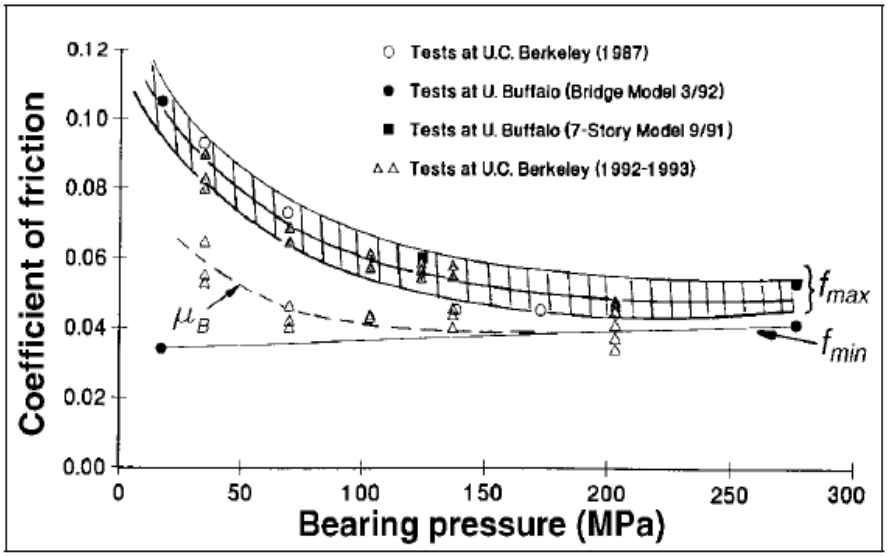
$$\mu_S = f_{max} - (f_{max} - f_{min})\exp^{a|\dot{u}|} \qquad (16)$$

حيث : μ_S - معامل الاحتكاك بالانزلاق . $\dot{u}$ - سرعة الانزلاق

f_{max} ، f_{min} - معاملي الاحتكاك الموافق للسرعات المنخفضة و العالية على الترتيب

a – معامل تحدد قيمته وفقاً لقيمة الضغط على المسند و لسرعة الانزلاق

يوضح الشكل (4) قيمة معامل الاحتكاك بالعلاقة مع الضغط المطبق على المسند .



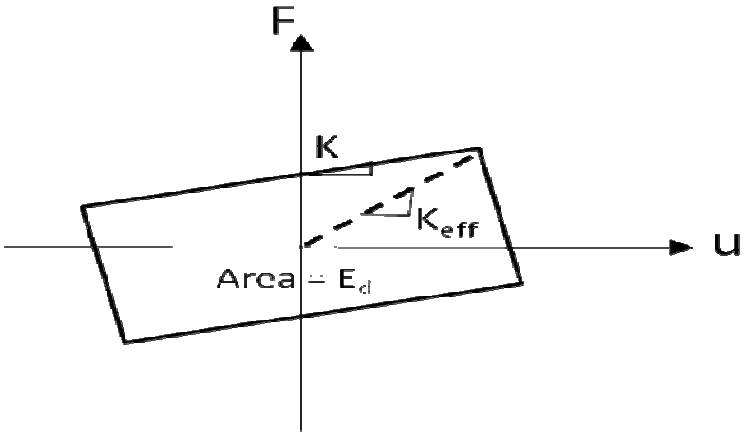
الشكل (4) – قيم معامل الاحتكاك لمساند FPS بالعلاقة مع الضغط المطبق

الصلابة الفعّالة $\mathbf{K_{eff}}$ و التخامد الفعّال $\boldsymbol{\zeta_{eff}}$ لعازل البندول الاحتكاكي الموافقتين للانتقال **u** [**15**] :

$$\mathbf{K_{eff} = \frac{F}{u} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{u}} \qquad (17)$$

$$\zeta_{eff} = \frac{E_d}{4\pi E_S} = \frac{4\mu W u}{4\pi\left(0.5 K_{eff} u^2\right)} = \frac{2\mu R}{\pi(\mu R + u)} \qquad (18)$$

في هذه الصيغة $E_d = 4\mu W u$ مساحة الحلقة التخلفية (الشكل 5) و $E_S = 0.5 K_{eff} u^2$



الشكل (5) – الحلقة التخلفية لتمثيل عازل البندول الاحتكاكي

تحسب الصلابة الشاقولية لنظام العزل وفق الصيغة [**12**]:

$$K_v = \frac{W}{g} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_v}\right)^2 \qquad (19)$$

في هذه العلاقة : **W**- وزن المنشأ ، T_v _ دور الاهتزاز الشاقولي للعازل و يؤخذ مساوياً **0.03 sec**
إن دور الاهتزاز الحر لنظام العزل المدروس مستقل عن وزن المنشأ المعزول **W** و يتعلق بنصف قطر التقعر للعازل **R** كما هو وارد بالصيغة التالية : [**13 , 12**]

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi\sqrt{\frac{W}{gK}} = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \qquad (20)$$

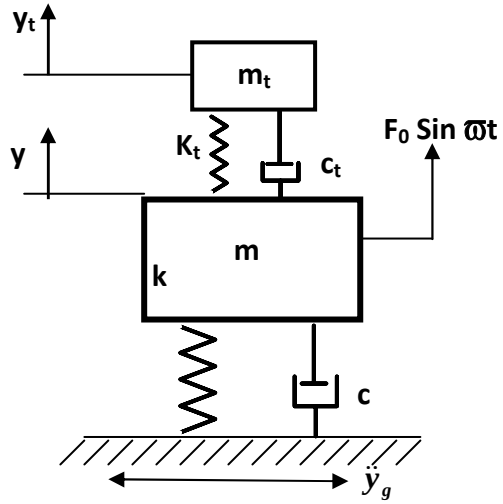
حيث : $M = \frac{W}{g}$ - كتلة المنشأ ، و $K = \frac{W}{R}$ - الصلابة الجانبية لعازل البندول الاحتكاكي و الناتجة خلال الحركة النوسية على السطح المقعر

4- مخمّد الكتلة المنسجمة: (TMD)

إن مخمّد الكتلة المنسجمة عبارة عن جملة جزئية اهتزازية تعلق بالمنشأ الرئيس بعنصر ذو صلابة مناسبة بهدف تخفيف الاستجابة الديناميكية بطريقة مثبتة دون أن نؤثر كثيراً في البنية الإنشائية للجملة المدروسة . يتصف مخمّد الكتلة المنسجمة بكتلته ، بطنينه و نسب تخامده. يمكن تمثيل **TMD** بجملة زنبرك - كتلة و مخمّد معلق من

جهة واحدة بالمنشأ الرئيس ، و يفضل أن تتوضع الجملة المضافة هذه عند نقطة محددة بدلاً من أن تكون موزعة على قسم من المنشأ . وهذا الميزة تجعل طريقة إخماد الاهتزاز ذات مفعول تراجعي مناسب .

لأجل النموذج ذات درجتي الحرية لجملة مهتزة مزودة بـ **TMD** خاضع لتأثير قوة توافقية $\mathbf{F(t) = F_0 Sin\varpi t}$ أو لتسارع أرضي $\mathbf{y_g}$ كما في الشكل (6) .



الشكل (6) – نموذج ذات كتلتين مجمعتين مزود بجملة TMD

يمكن أن نكتب المعادلات الحاكمة للحركة بالشكل التالي [**17, 16**] :

$$\mathbf{m\ddot{y} + c\dot{y} + ky + c_t(\dot{y} - \dot{y}_t) + k_t(y - y_t) = F_0 Sin\varpi t} \qquad \mathbf{(21)}$$

$$\mathbf{m_t\ddot{y}_t + c_t(\dot{y}_t - \dot{y}) + k_t(y_t - y) = 0} \qquad \mathbf{(22)}$$

حيث : **m , k** و **c** – كتلة ، صلابة و تخامد الجملة الرئيسية على الترتيب ، ϖ - تردد القوة المحرضة

K_t , m_t و **c_t** – كتلة ، صلابة و تخامد مخمّد الكتلة المنسجمة (**TMD**)

أما إذا افترضنا أن الجملة السابقة معرضة لتسارع أرضي $\ddot{y}_g$ ناجم عن هزة أرضية عندها ستخضع الكتلة **m** لانتقال نسبي $\mathbf{u = y - y_g}$ و تكون معادلات الحركة كالآتي :

$$\mathbf{m\ddot{y} + c(\dot{y} - \dot{y}_g) + k(y - y_g) + c_t(\dot{y} - \dot{y}_t) + k_t(y - y_t) = 0} \qquad \mathbf{(23)}$$

$$\mathbf{m_t\ddot{y}_t + c_t(\dot{y}_t - \dot{y}) + k_t(y_t - y) = 0} \qquad \mathbf{(24)}$$

يمكن كتابة العلاقات (21) و (22) بالصيغة المصفوفية:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m_t} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}} \\ \ddot{\mathbf{y}}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c + c_t} & \mathbf{-c_t} \\ \mathbf{-c_t} & \mathbf{c_t} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{y}} \\ \dot{\mathbf{y}}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k + k_t} & \mathbf{-k_t} \\ \mathbf{-k_t} & \mathbf{k_t} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{y_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F_0 Sin\varpi t} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{(25)}$$

يمكن إعطاء التحريض بصيغة أكثر عمومية بحيث يكون مؤلفاً من قسم حقيقي و قسم تخيلي:

$$\mathbf{F(t) = F_0\, e^{i\,\varpi t}} \qquad \mathbf{(26)}$$

بفرض أن حل الحالة المستمرة لمعادلتي الحركة (21) و (22) هو من الشكل :

$$\begin{bmatrix} y \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \\ Y_t \end{bmatrix} e^{i\bar{\omega}t} \qquad (27)$$

و بالتالي المشتق الأول و الثاني بالنسبة للزمن هو:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{y}_t \end{bmatrix} = i\bar{\omega} e^{i\bar{\omega}t} \begin{bmatrix} Y \\ Y_t \end{bmatrix} \quad ، \quad \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{y}t \end{bmatrix} = -\bar{\omega}^2 e^{i\bar{\omega}t} \begin{bmatrix} Y \\ Y_t \end{bmatrix} \qquad (28)$$

بتبديل المعادلات (27) و (28) في الصيغة المصفوفية (25) وبعد الاختصار على الحد المشترك $e^{i\bar{\omega}t}$ ينتج :

$$\begin{bmatrix} \left(-m\bar{\omega}^2 + k + k_t\right) + \left(c + c_t\right) i\bar{\omega} & -k_t - c_t\, i\bar{\omega} \\ -k_t - c_t\, i\bar{\omega} & \left(-m_t\bar{\omega}^2 + k_t\right) + c_t i\bar{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ Y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (29)$$

باستخدام قاعدة كرامر (Cramer's rule) نحصل على السعات :

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} F_0 & -k_t - c_t\bar{\omega}i \\ 0 & -m_t\bar{\omega}^2 + k_t + c_t\bar{\omega}i \end{vmatrix}}{D} = \frac{-m_t\bar{\omega}^2 + k_t + c_t\bar{\omega}i}{D} F_0 \qquad (30)$$

$$Y_a = \frac{\begin{vmatrix} -m\bar{\omega}^2 + \left(c + c_t\right)\bar{\omega}i + k + k_t & F_0 \\ -c_t\,\bar{\omega}i - k_t & 0 \end{vmatrix}}{D} = \frac{k_t + c_t\bar{\omega}i}{D} F_0 \qquad (31)$$

$$D = \left(-m\bar{\omega}^2 + \left(c + c_t\right)\bar{\omega}i + k + k_t\right)\left(-m_t\bar{\omega}^2 + c_t\bar{\omega}i + k_t\right) - \left(c_t\bar{\omega}i + k_t\right)^2$$

يتضح من العلاقتين (30) و (31) أن الإزاحات تعتمد بشكل خطي على سعة القوة المحرضة F_0 .
انتقالات الجملة الناجمة عن حالة الاهتزاز المستمر و العائدة للتحريض التوافقي ستكون [**16**]:

$$\left|Y\left(i\bar{\omega}\right)\right| = \left|\frac{-m_t\bar{\omega}^2 + k_t + c_t\bar{\omega}i}{D\left(i\bar{\omega}\right)} F_0\right| \qquad (32)$$

$$\left|Y_t\left(i\bar{\omega}\right)\right| = \left|\frac{k_t + c_t\bar{\omega}i}{D\left(i\bar{\omega}\right)} F_0\right| \qquad (33)$$

بهدف كتابة العلاقة (32) بالصيغة الأكثر ملاءمة نعرف ما يلي :

الترددات الطبيعية: $\omega_t = \sqrt{\frac{k_t}{m_t}}$ ، $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ، نسبة الكتلة : $\mu = \frac{m_t}{m}$

النسب الترددية : $r = \frac{\bar{\omega}}{\omega}$ ، $\beta = \frac{\omega_t}{\omega}$ ، نسب التخامد : $\alpha_t = \frac{c_t}{2m_t\omega_t}$ ، $\alpha = \frac{c}{2m\omega}$

الانتقال الستاتيكي للجملة الأساسية : $y_{st} = \frac{F_0}{k}$ ، $\bar{\omega}$ ، التردد القسري للقوة المحرضة

ω - ω_t - تردد الاهتزاز الحر للمنشأ ، تردد مخمّد الكتلة المنسجمة **(TMD)** على الترتيب
بتبديل الصيغ السابقة في علاقة الانتقال نجد [**16**]:

$$\left|\frac{Y}{y_{st}}\right|(r)=\frac{\sqrt{\left(\beta^2-r^2\right)^2+\left(2\alpha_t r\beta\right)^2}}{\sqrt{\left[\left(r^2-\beta^2\right)\left(1-r^2\right)+\mu r^2\beta^2+4\alpha\alpha_t r^2\right]^2+\left[2\alpha_t\beta r\left(r^2+\mu r^2-1\right)+2\alpha r\left(r^2-\beta^2\right)\right]^2}} \qquad (34)$$

هذه العلاقة تحتوي على البارامترات الرئيسية ولا تتعلق بحجم مخمّد **TMD** . بالتالي النتائج التي سيتم الحصول عليها بالعلاقة (**34**) ستكون عامة و ستزودنا بمراجعة نوعية لمواصفات **TMD** .كما أن الطرف الأيسر للمعادلة (نسبة الانتقال) يمكن تفسيره على أنه معامل التضخيم الديناميكي ، حيث قيمة هذا المعامل تظهر كم مرة سعة الانتقال الديناميكي أكبر من سعة الانتقال الستاتيكي .

إن التصميم الأمثل يتم بتحقيق الانسجام في نظام **TMD** بحيث تكون قمم الرنين عند ذات قيمة المقدار (magnitude value) ، وهذا يتحقق باختيار صلابة مثلى وتخامّد أمثل لـ **TMD** [**16**] :

$$\beta_{opt}=\frac{1}{1+\mu} \qquad (35)$$

$$\alpha_{t\,opt}=\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \qquad (36)$$

تشير العلاقة (35) إلى أن رنين يحدث دائما عند تردد منخفض أقل من التردد الطبيعي للجملة الأساسية (المدروسة) . لأجل النسب العملية للكتلة من **15 %** $\rightarrow$ **1** حيث النسب الأعلى من ذلك تجعل الهدف الرئيسي من استخدام **TMD** يتلاشى ، فإن النسبة الترددية المثلى تتراوح بين **0.87 – 0.99** و نسبة التخامد المثلى تكون ضمن المجال **6 – 22 %** .

تقدم المراجع [**17 , 18 , 19**] أيضاً العلاقات المثلى لنسبة التردد β_{opt} و نسبة التخامد $\alpha_{t\,opt}$ لنظام **TMD** بالشكل :

$$\beta_{opt}=\frac{1}{1+\mu}\left(1-\alpha\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right) \qquad (37)$$

$$\alpha_{t\,opt}=\frac{\alpha}{1+\mu}+\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \qquad (38)$$

لأجل التطبيقات العملية من الضروري الحصول على صلابة مثلى لنظام **TMD** و التي سنرمز لها بـ $k_{t\,opt}$ و معامل تخامد أمثل $c_{t\,opt}$. هذان البارامتران يمكن اشتقاقهما باستخدام β_{opt} و $\alpha_{t\,opt}$ [**17, 18**] :

$$k_{t\,opt}=m_t\omega^2\,\beta_{t\,opt}{}^2=\frac{m_t\omega^2}{(1+\mu)^2}\left(1-\frac{\alpha}{1+\mu}\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right)^2 \qquad (39)$$

$$c_{t\,opt}=2m_t\omega\beta_{opt}\alpha_{t\,opt}=\frac{2m_t\omega}{1+\mu}\left(1-\alpha\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right)\left(\frac{\alpha}{1+\mu}-\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}\right) \qquad (40)$$

يقترح المرجع [**20**] أن تكون النسبة بين صلابة الرابط المرن (k_t) الحامل للكتلة المخمّدة و بين الكتلة المخمّدة (m_t) تساوي إلى مربع التردد القسري لقاعدة المنشأ المدروس . حيث في هذه الحالة سيبقى المنشأ المدروس في حال حدوث الرنين بمناءً عن الاهتزازات و ستحدث الاهتزازات رنينية في نظام **TMD** .

النتائج والمناقشة

كتطبيق عملي سنقوم بإيجاد الاستجابة الديناميكية المتمثلة بقيم الإزاحات النسبية عند القمة و قيم قوى القص عند مستوي القاعدة وعزوم الانحناء عند قاعدة خزان ماء عالي دائري الشكل من الخرسانة المسلح (الشكل 7) سعته $400\ m^3$ تحت تأثير أحمال الزلازل، و ذلك بمساعدة البرنامج الهندسي **SAP 2000** قبل عزله زلزالياً بعازل البندول الاحتكاكي **(FPS)** و بمخمّد الكتلة المنسجمة **(TMD)** و بعده .ارتفاع الخزان **34,45 m** ، نصف القطر الداخلي للحوض **5 m** ، ارتفاع الحوض **11.75 m** ، الارتفاع الوسطي للشريحة المائية **8.1 m** ، عامل مرونة بيتون الإنشاء $E=2.97\cdot10^7\ kN/m^2$.

قمنا بنمذجة الخزان بالشكل الفراغي وأجرينا له التحليل الديناميكي وفق طيف استجابة تم تصميمه اعتمادا على المعاملات الزلزالية التالية: معامل المنطقة الزلزالية **Z = 3.0** ، نموذج مقطع تربة التأسيس **S_D**، المعاملين **C_a=0.36** ، **C_v= 0.54** (الشكل 8) وذلك للحالات التالية : حالة الخزان فارغ ، حالة الخزان فارغ بعد عزله زلزالياً بعازل البندول الاحتكاكي **(FPS)** و بمخمّد الكتلة المنسجمة **(TMD)** ، حالة الخزان مليء ، حالة الخزان مليء بعد عزله زلزالياً بعازل البندول الاحتكاكي **(FPS)** و بمخمّد الكتلة المنسجمة **(TMD)** .

حيث أخذنا تفاعل السائل مع المنشأ و حسبنا الكتل المكافئة للسائل وارتفاعها عن قاعدة حوض الخزان و فق العلاقات (4 - 8) و كانت القيم كالآتي: كتلة الماء في حوض الخزان: **m_w=648491.33 kg** ، الكتلة الحملية: **m_c= 126642.35 kg** الكتلة الدفعية: **m_i = 477575 kg** ، صلابة الزنبرك: **k_c = 454839.822 N/m** ارتفاع نقطة تركيز الكتلة الحملية ضمن الحوض: **h_c= 5. 645 m** ، ارتفاع نقطة تركيز الكتلة الدفعية ضمن الحوض: **h_i = 3.04 m** .

- تصميم نظام العزل FPS :

- الصلابة الأولية للعازل : **32254.07 kN / m** وذلك باعتبار ان انتقال الخضوع للعازل **u_y= 2.5 mm**
- الصلابة الفعّالة بالاتجاه الشاقولي علاقة (19) : **5785924 kN/m**
- الصلابة الفعّالة بالاتجاه الأفقي علاقة (17) : **1137.571 kN/m**
- معامل الاحتكاك الأصغري و الأعظمي : **0.06 ، 0.09**
- نصف قطر التقعر : **R = 1.5 m**

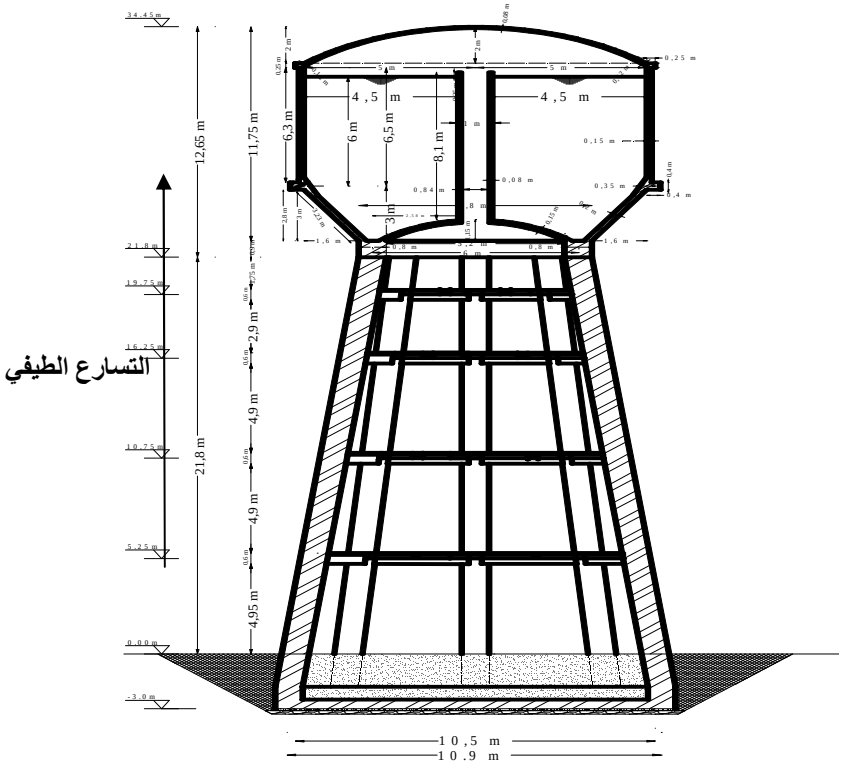
- تصميم نظام TMD:

تم تصميم نظام مخمّد الكتلة المنسجمة لحالة الخزان فارغ و مليء و ذلك بأخذ قيمتين لنسبة الكتلة: $\mu= 0.05 \Rightarrow m_t=0.05m$ ، $\mu= 0.10 \Rightarrow m_t=0.10m$. على النحو الآتي :

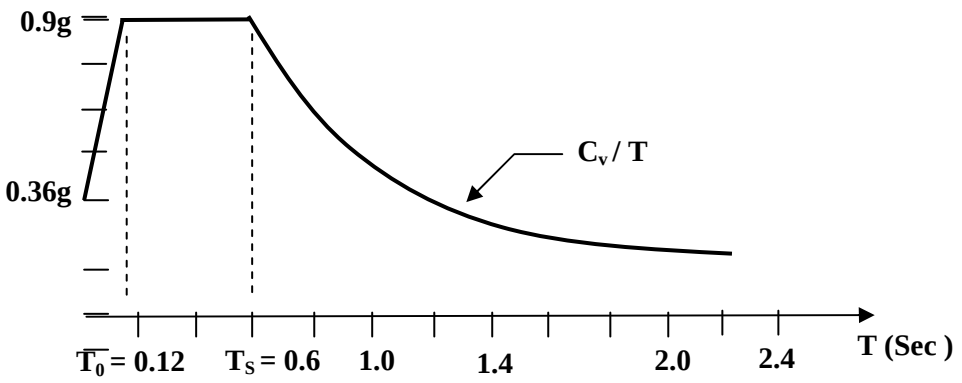
- **حالة الخزان فارغ : μ = 5%** :

- كتلة الخزان : $m=\frac{W}{g}=\frac{6852}{9.81}=698.47\ kN.Sec^2/m$ ،
- كتلة المخمّد : $m_t = 0.05 \cdot 698.47 = 34.92 \approx 35\ kN\cdot Sec^2/m$
- نسبة التردد المثلى : $\beta_{opt}=\frac{1}{1+0.05}=0.952$
- نسبة التخامد **المثلى** : $\alpha_{t\,opt}=\sqrt{\frac{3\cdot0.05}{8(1+0.05)}}=0.134$
- الصلابة المثلى لزنبرك الكتلة :

$$k_{t\,opt}=m_t\omega^2\beta_{t\,opt}{}^2=35\cdot(11.619)^2\,(0.952)^2=4282.32\,kN/m$$



الشكل (7) : مقطع رأسي في هيكل الخزان العالي



الشكل (8) : طيف الاستجابة التصميمي

- **حالة الخزان فارغ : μ = 10% :**
  - كتلة الخزان : $m = 698.47\ kN\cdot Sec^2/m$ ،
  - كتلة المخمّد : $m_t = 0.10 \cdot 698.47 = 69.85\ kN\cdot Sec^2/m$
  - نسبة التردد المثلى : $\beta_{opt} = \frac{1}{1+0.10} = 0.91$

- نسبة التخامد **المثلى :** $\alpha_{t\,opt} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0.10}{8(1+0.10)}} = 0.184$

- الصلابة المثلى لزنبرك كتلة المخمّد : $k_{t\,opt} = 69.85 \cdot (11.619)^2 (0.91)^2 = 7808.84\,kN/m$

بذات الآلية تم حساب المعاملات الخاصة بالخزان المليء فكانت النتائج كما يلي :

- **<u>حالة الخزان مليء : μ = 5% :</u>**

- كتلة الخزان : $m_t = 1302.68\ kN \cdot Sec^2/m$ ، كتلة المخمد : $m_t = 65.13\ kN \cdot Sec^2/m$
- نسبة التردد المثلى : $\beta_{opt} = 0.952$ ، نسبة التخامد المثلى : $\alpha_{t\,opt} = 0.134$
- الصلابة المثلى لزنبرك كتلة المخمّد : $k_{t\,opt} = 65.13 \cdot (2.573)^2 (0.952)^2 = 390.78\,kN/m$

- **<u>حالة الخزان مليء : μ = 10% :</u>**

- كتلة الخزان : $m_t = 1302.68\ kN \cdot Sec^2/m$ ، كتلة المخمد : $m_t = 130.27\ kN \cdot Sec^2/m$
- نسبة التردد المثلى : $\beta_{opt} = 0.910$ ، نسبة التخامد المثلى : $\alpha_{t\,opt} = 0.184$
- الصلابة المثلى لزنبرك كتلة المخمّد :

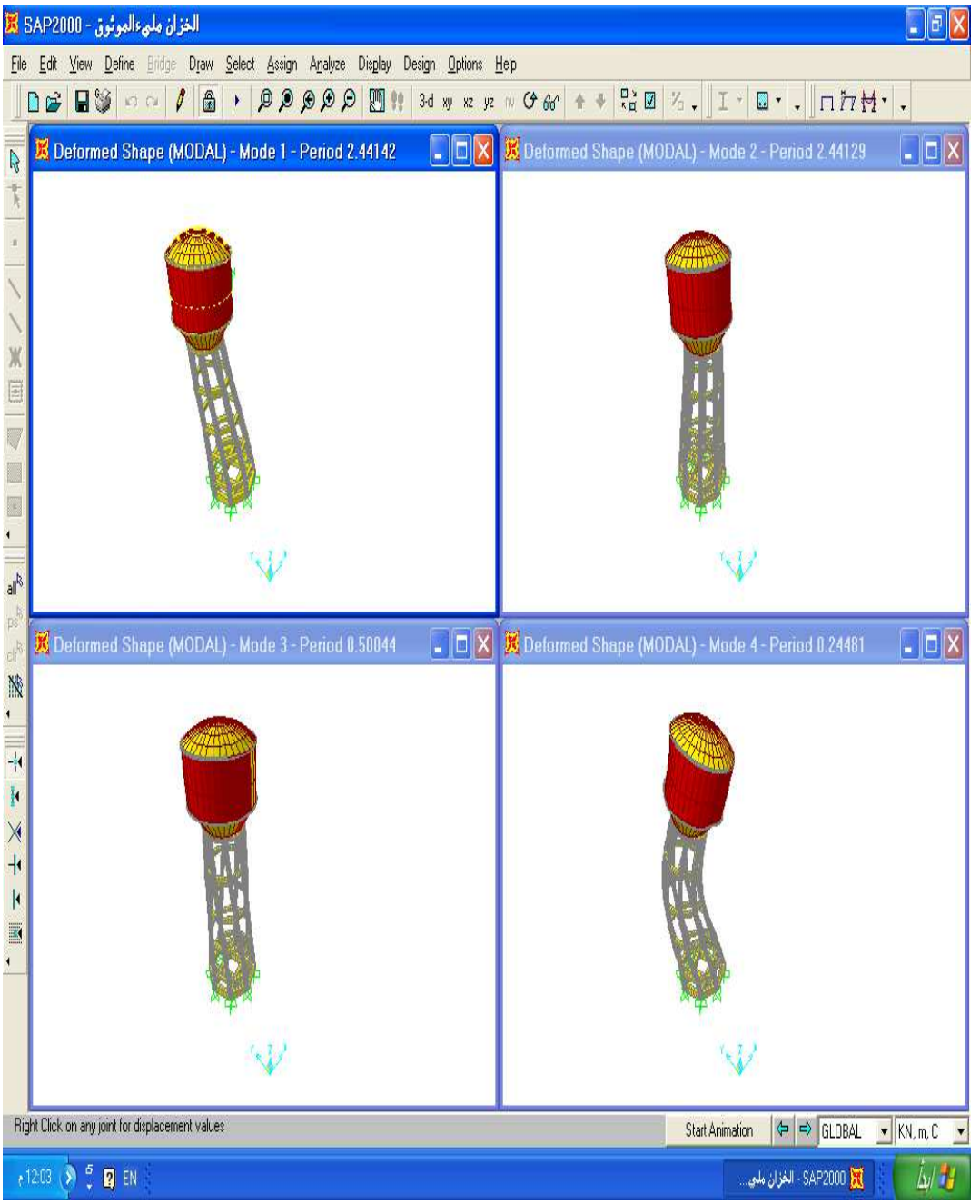
$$k_{t\,opt} = 130.27 \cdot (2.573)^2 (0.910)^2 = 714.16\,kN/m$$

قمنا بإضافة نظام **TMD** إلى قمة الخزان و أعدنا التحليل الديناميكي للحالتين المذكورتين .
نتائج التحليل الديناميكي للخزان المدروس قبل العزل وبعده مبيّنة بالجدول (1) .

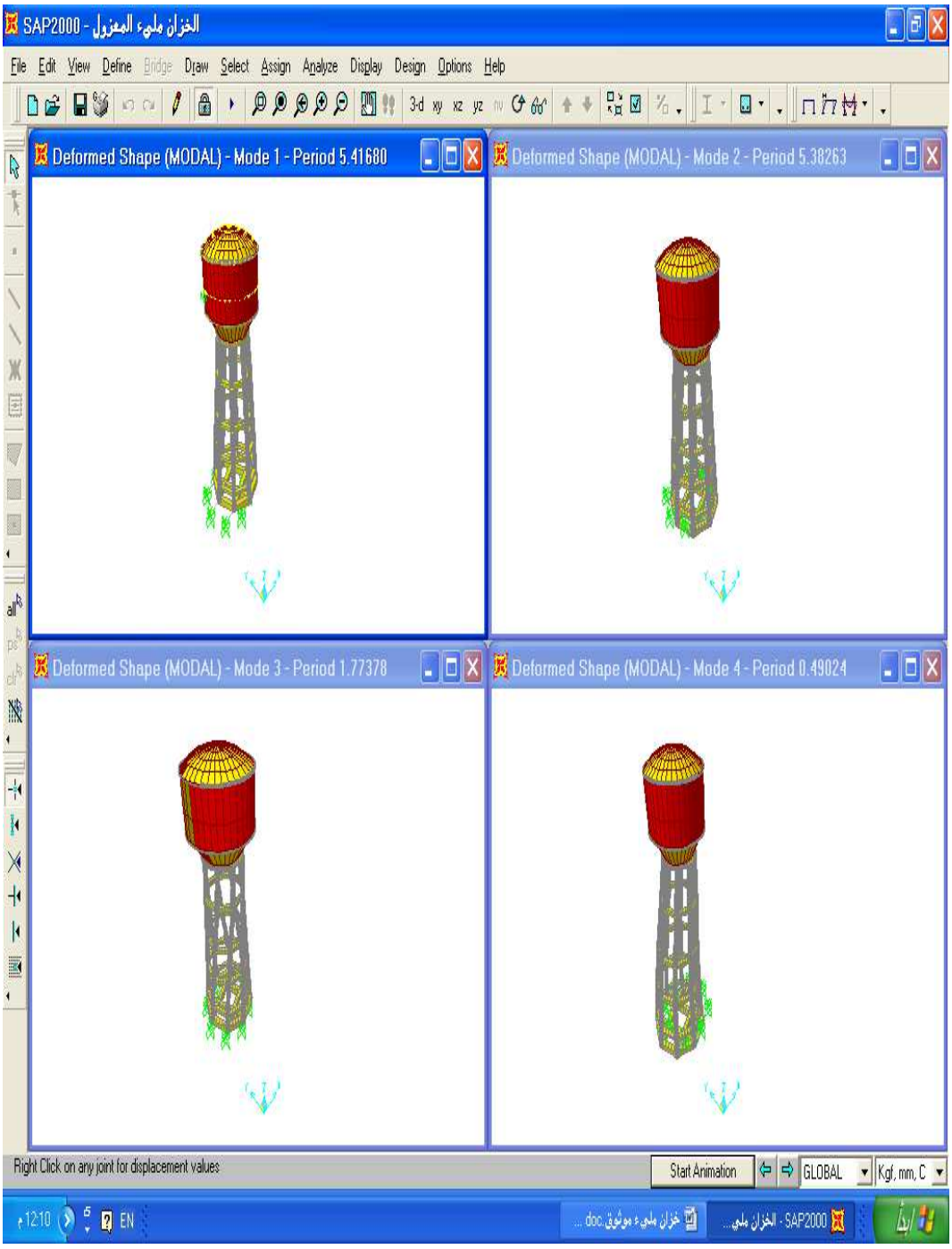
الجدول (1) قيم الاستجابة الناتجة عن التحليل الديناميكي للخزان المدروس

	دور الاهتزاز (Sec)	الإزاحات (m)		القص عند مستوي القاعدة (k N)		عزوم الانحناء (k N . m)	
		(x)	(y)	(x)	(y)	(x)	(y)
الخزان فارغ و مثبت بالقاعدة	0.541	0.066	0.066	3688.88	3695.24	83929.17	83884.33
الخزان فارغ و معزول بنظام FPS	1.617	0.227	0.227	2283.73	2284.10	32897.23	32905.76
الخزان فارغ و معزول بنظام TMD، μ=5%	2.183	0.061	0.061	3369.21	3431.99	79571.54	79069.19
الخزان فارغ و معزول بنظام TMD، μ=10%	2.579	0.069	0.069	3505.05	3492.13	86835.08	92723.49
الخزان مليء و مثبت بالقاعدة	2.441	0.304	0.304	13815.30	13818.08	387884.66	387857.25
الخزان مليء و معزول بنظام FPS	5.416	0.706	0.719	6414.45	6535.78	177335.46	174612.82
الخزان مليء و معزول بنظام TMD، μ=5%	8.217	0.252	0.30	11490.61	13640.58	381977.05	321583.02
الخزان مليء و معزول بنظام TMD، μ=10%	8.753	0.248	0.296	11355.20	13523.28	378315.18	317536.88

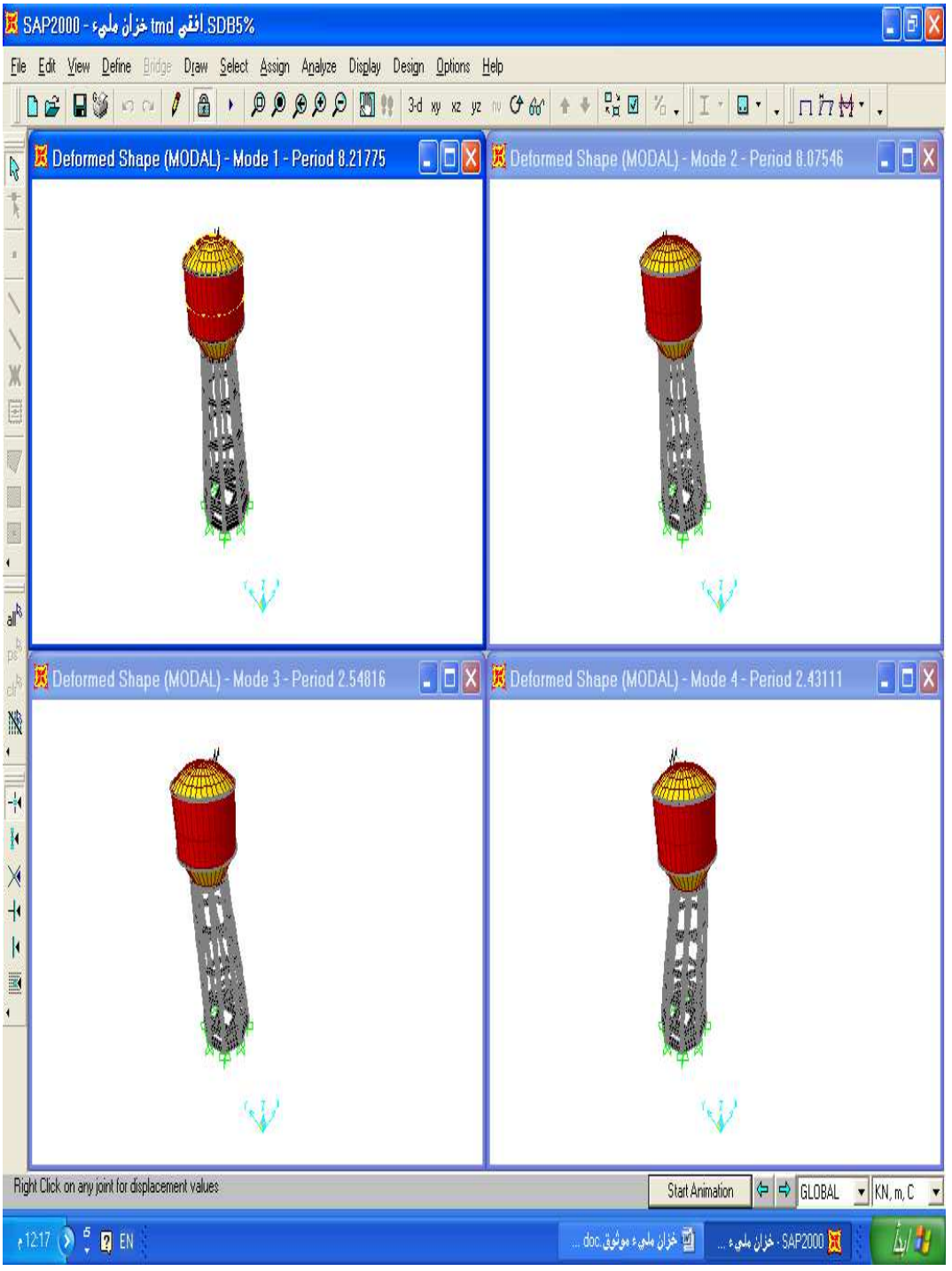
أنماط الاهتزاز الأربعة الأولى لحلة الخزان مليء قبل عزله بنظام FPS و بنظام TMD و بعده معطاة بالأشكال (9 ، 10 ، 11)



الشكل (9) – الأنماط الأربعة الأولى لحالة الخزان مليء ومثبت بالأرض



الشكل (10) – الأنماط الأربعة الأولى لحالة الخزان مليء و معزول بنظام FPS



الشكل (11) – الأنماط الأربعة الأولى لحالة الخزان مليء و معزول بنظام TMD

الاستنتاجات و التوصيات

1 – إن استخدام كلاٍ من نظامي العزل FPS وTMD قد ساهم في زيادة دور الاهتزاز لحالتي الخزان فارغ و مليء كما هو واضح من قيم الجدول (1) ، حيث كانت الزيادة الكبرى في قيمة الدور هي الموافقة لنظام TMD في حالة الخزان مليء و قد بلغت قيمته 8.753Sec و هذا يتوافق مع ما أوردناه في سياق البحث حول المركبة الحملية التي تساهم بها كتلة السائل التي تتعرض لحركة اضطرابية بدور اهتزاز يمكن أن يصل إلى 10 Sec

2 – أدى استخدام نظام العزل FPS إلى زيادة قيم الإزاحات المطلقة عند قمة الخزان لكن ما يعنينا في الدراسة هي قيم الإزاحات النسبية (بالنسبة إلى قاعدة الخزان) التي كانت صغيرة و محققة

3 – ساهم نظام العزل FPS في تخفيض قيم قوى القص عند مستوي القاعدة لحالة الخزان فارغ بنسبة 38% تقريباً في كلٍ من الاتجاهين x و y بينما كانت نسبة التخفيض لحالة الخزان مليء بحدود 53% لكلٍ من الاتجاهين . أما نظام العزل TMD في حالة نسبة الكتلة 5% أدى إلى تخفيض قيمة القص عند مستوي القاعدة بنسبة 8.66% باتجاه x و 7.12% باتجاه y لحالة الخزان فارغ و لأجل نسبة الكتلة 10% انخفضت هذه النسبة إلى 5% تقريباً بالاتجاهين أما نسبة الكتلة 5% لحالة الخزان مليء أدت إلى تخفيض قوة القص عند مستوي القاعدة بنسبة وسطية 1.4% لكل اتجاه و ازدادت هذه النسبة لتصل إلى 17.8% باتجاه x و 2.13 %باتجاه y

4 – أدى استخدام نظام العزل FPS إلى تخفيض قيم عزوم الانحناء عند قاعدة الخزان في اتجاه كلٍ من x و y بحدود 60.8% لحالة الخزان فارغ و هي بحدود 54% لحالة الخزان مليء . أما نظام TMD حيث نسبة الكتلة 5% فقد أدى إلى تخفيض عزوم الانحناء عند قاعدة الخزان فارغ بنسبة 5.5% ، و عند أخذ نسبة الكتلة 10% ازدادت العزوم بالاتجاهين لحالة الخزان فارغ ، أما بخصوص الخزان مليء فقد انخفضت قيم عزوم الانحناء عند قاعدته بنسبة 1.5% و بنسبة 2.4% الموافقتين لنسب الكتلة 5% و 10% على الترتيب بالاتجاه x، بينما بالاتجاه y كانت نسب التخفيض18.13% ,17.08% بالعلاقة مع نسبتي الكتلة المدروستين

5 – استناداً إلى نتائج الدراسة السابقة نجد أن نظام العزل FPS أكثر فاعلية في تخفيض قيم الاستجابة من حالة استخدام نظام TMD لكن من الناحية التقنية و التنفيذية فإن النظام FPS أكثر كلفة و يحتاج إلى تقنيات خاصة بالتنفيذ بعكس حالة النظام TMD الذي هو أقل كلفة و أسهل من الناحية التنفيذية هذا من جهة و من جهة أخرى حتى يتم الحكم بدقة أكثر على قدرة النظام TMD في تخفيض قيم الاستجابة على هذا النوع من المنشآت الخاصة ننصح بإجراء دراسة على قيم مختلفة لنسبة الكتلة و لنسبة التخامد، و بالتالي لنسبة صلابة زنبرك الكتلة المنسجمة

6 – إن هدف نظام العزل هو إطالة الدور الطبيعي لاهتزاز المنشأ و هذا سيؤدي إلى تخفيض قيم التسارع الزائف و بالتالي القوى المتولدة في المنشأ من جراء الزلازل ، لكن هذا الأمر قد لا يفي بالغرض المطلوب في بعض الحالات النادرة و ذلك في حالة تأثير الزلازل ذات السجلات الزلزالية التي تبلغ قيم الذروة فيها بعد فترة زمنية طويلة نسبياً قد يكون بحدود 2 Sec أو أكثر كما في حالة زلزال Mexico City عام 1985 حيث بلغ الزلزال تسارعه الأعظمي عن 2 Sec نظراً لخاصية التربة المحلية، فعند إطالة دور المنشأ إلى هذه القيمة سنقع في المحظور نتيجة توافق دور المنشأ مع دور الاستجابة العظمى ، لذلك يوصي البحث بدراسة خصائص تربة التأسيس و العوامل المؤثرة على تضخيم الحركات الزلزالية في الموقع قبل اختيار نظام العزل المناسب للمنشأ المدروس .

المراجع العلمية

1 – JAISWAL, O .R, RAI,D.C, JAIN,M.S. *Review of Seismic Codes on Liquid-Containing Tanks*, Earthquake Spectra, Vol. 23,No.1,2007, 239-260

2- SAP 2000, *Integrated Software for Structural Analysis & Design Computers and Structures Inc*, Berkeley, CA, 2004,790.

3 – LIVAOGLU, R, DOGANGUN, A. *Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction*, Journal of Fluids and Structures,Vol.22, 2006, 421-439.

4– LIVAOGLU, R. *Investigation of seismic behavior of fluid-rectangular tank-soil foundation systems in frequency domain*, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28, 2008, 132-146.

5 – ASCE 7 – *Minimum Design Load for Building and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2005, 560.

6 - JAISWAL, O.R, JAIN, S.K. *Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks*, Indian Institute of Technology Kanpur, India, Report No IITK-GSDMA-EQ-08,2007

7 –RAI, D.C. *Seismic retrofitting of R⁄C shaft support of elevated tanks*, Earthquake Spectra. Vol.18, 2002, 745-760.

8 – ACI 371R-98, *American Concrete Institute*, Guide to the Analysis Design and Construction of Concrete-pedestal Water Tower, 1995, 345.

9 – SEZEN, H, LIVAOGLU, R, *Dynamic analysis and seismic performance evaluation of above-ground liquid-containing tanks*, Engineering Structures,Vol.30,2008, 794-803.

10 – EUROCODE -8 -*Design of Structures for Earthquake Resistance*, Part 4, Silos , Tanks, and Pipelines ,Final PT Draft .European Committee for Standardization, 2003.

11 – MALHOTRA, P.K., WENK,T.,WEILAND, M. *Simple procedure of seismic analysis of liquid-storage tanks*, Journal of Structural Engineering International ,IABSE, Vol..10, N^0. 3 , 2000, 197-201.

12–Earthquake Protection Systems (EPS), *Friction Pendulum Seismic Isolation Bearing*, 2008, 15 October, 2008.
<http://www.earthquake protection.com>.

13 – BARROSO,L. R. *Performance Evaluation of Vibration Controlled Steel structures Under Seismic Loading*, 2006 , 15 March, 2009,.
http://ceprofs.tamu.edu/ibarroso/research/papers/THESIS.PDF

14 -PRANESH, M., SINHA, R. *VFPI: an isolation device for a seismic design*, Journal of Earthquake Engineering And Structural Dynamics, U.S.A.Vol.29, N^o. 5, 2000, 603-627.

15 – FEMA 451,Instructional Material Complementing, Design Examples, 2006

16 – LIEDES, T. *Improving the Performance of the Semi-Active Tuned Mass Damper*, Academic dissertation ,Faculty of Technology of the University .of Oulu,2009, 150.

17 -CHEY, M .H., CARR, A .J., CHASE, J.G .*Resetable Tuned Mass Damper and its application to isolated stories building system*,14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China , 2008, 420-428.

18 - CHEY, M .H., Carr, A .J., Chase, J.G .*Design of Semi-Active Tuned Mass Damper Building Systems using Resetable Devices*, 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering ،Singapore, 2006, 351-360.

19– JULIO, C .M .*On tuned mass dampers for reducing the seismic response of structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics ،Vol. 34, 2005, 847–865

20 – PAPOF, N.N, ZABERAEF, A.F. - *Computation and Designing of the Concrete and Masonry Structures*, SSSR Moscow, 1989, 400.