

دراسة نماذج من القشريات الكروية البيتونية المسلحة تحت تأثير الحمولات الزلزالية

أ.د. أكرم صقور *

م. علي الحايك **

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/١٤ . قُبِلَ للنشر في ٢٠٢٥/٥/٢٠)

□ ملخص □

تمتاز القشريات بأنها تغطي منشآت تتميز بمجازات كبيرة مما يجعلها تشكل أهمية في الصالات والمعارض والمطارات وغيرها من الأماكن كدور العبادة، مما يجعل مقاومتها للأحمال الزلزالية أمر هام للدراسة. هذا البحث هو مساهمة في دراسة سلوك القشريات الكروية تحت تأثير الحمولات الزلزالية من خلال تطبيق الحمولة الزلزالية باستخدام طيف الاستجابة باستخدام برنامج SAP2000 على مجموعة من تسعة نماذج. تم التوصل إلى أن الانتقال الأعظمي والقوى الداخلية الاعظمية تكون في أماكن اتصال القشريات مع الجائز الحلقي وان النمط الأول هو المسيطر وهو انسحابي كذلك تم دراسة العلاقة بين النسبة $\frac{R}{T} = \frac{\text{نصف قطر القشرية}}{\text{سماكة القشرية}}$ وكل من الدور وقوة القص والانتقال الأعظمي وذلك من أجل النماذج المدروسة وتم التوصل لمجموعة من النتائج والتوصيات.

الكلمات المفتاحية: القشريات الكروية، الحمولات الزلزالية، القنب.

*أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية جامعة اللاذقية

** طالب دكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية في كلية الهندسة المدنية جامعة اللاذقية، اللاذقية

Study of models of reinforced concrete spherical shells under seismic loads

Prof. Dr. Akram Sakour*

Ali Al-Hayek**

(Received 14/10/2025 . Accepted 20/5/2025)

□ ABSTRACT □

Spherical shells are characterized by their long spans, providing spacious areas, which makes them significant in venues such as halls, exhibitions, airports, and places of worship. Therefore, their resistance to seismic loads is an important subject for study. This research contributes to the understanding of the behavior of spherical shells under seismic loads by applying seismic loading using the response spectrum method with the SAP2000 software on nine models. It was found that the maximum displacement and the maximum internal forces occur at the connections between the shells and the circular beams, with the first mode being dominant and exhibiting a translational behavior. Additionally, the relationship between the ratio $\frac{R}{T} \left(\frac{\text{shell diameter half}}{\text{shell thickness}} \right)$ and both the period and shear force, as well as the maximum displacement for the studied models, was analyzed, leading to a set of findings and recommendations.

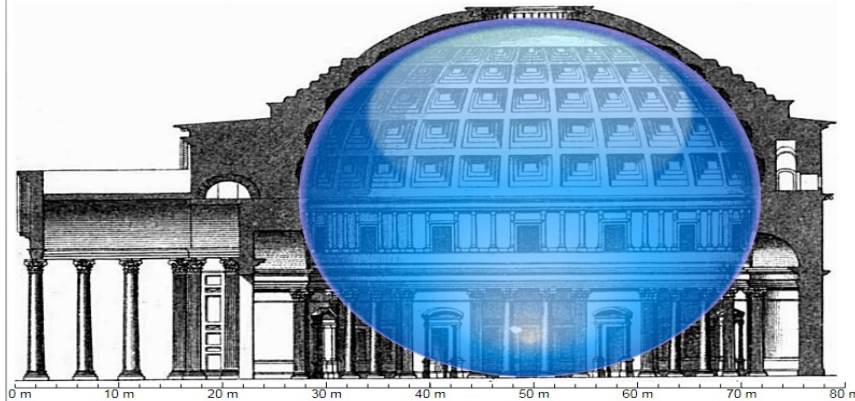
Key Words: Spherical shell, Seismic, Dome,

*Professor in the Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Lattakia University

**PhD student in the Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Lattakia University, Lattakia

١- المقدمة:

إن أول استخدام للقشريات كان في مبنى الـ Pantheon في روما والذي بني في العام 169AD ، وقد كان بناؤه من قبل الإمبراطور "هادريان" وتدعى بقبة البانثيون انترادوس، وهي واحدة من أكبر القباب في العالم بقطر 43.3m ، محاطة بجدران حجرية سميكة وثمانية أعمدة كبيرة يتوزع عليها وزن القبة النصف كروية، تضم في قمته فتحة دائرية تدعى (أوكلوس) تسمح بإضاءة البيئة الداخلية من خلال مرور ضوء الشمس وهي موضحة بالشكل (١). [1]



الشكل (١) مبنى البانثيون روتوندا انترادوس روما [1]

تحدث الزلازل بشكل مفاجئ ودون سابق إنذار، تحمل معها آثاراً كبيرة على سلامة القاطنين، وإن القشريات هي من المنشآت الضخمة التي غالباً ما تكون بداخلها تجمعات بشرية كبيرة، و تعرضها لأضرار كبيرة أثناء الزلازل قد يؤدي لعواقب مدمرة لا يمكن التنبؤ بحجمها، وبالتالي لابد من إجراء البحوث الزلزالية لمثل هذه المنشآت.

تكمّن ميزة القباب في صلابتها وقوتها حيث من الممكن أن تكون من دون أعمدة أو أن تنفذ بمجازات كبيرة فهي تتمتع بالمتانة والقوة، من الممكن أن تصل لقدرات تحمل أكبر من عدة أنواع من الهياكل التقليدية، تكمن قلة تنفيذ القشريات بسبب تعقيد عملية تحليلها وتصميمها وكذلك عملية تنفيذها [2]. تكون الحمولة الأساسية للقبة هي وزنها الذاتي لذلك فإن الذي يحكم وظيفتها هو شكلها وهندستها لحد كبير، وهي تخضع

لتركيبات أحمال مختلفة بالإضافة لسلوكيات غير خطية ثلاثية الأبعاد لها و لموادها، هذه الظروف المعقدة تجعل تحليل السلوك الهيكلي لها غير دقيق [3] .

في المناطق التي تكون أكثر عرضة لاحتمال الزلازل يعد حمل الزلازل على المنشآت هو الحمل الأكثر خطورة على المنشآت، ومن أجل المنشآت القشرية فقد تم دراسة خصائص اهتزاز القشريات بشكل عام من قبل: [5](Chakravorty and Bandyopadhyay, 1995), [4](Leissa, 1993), [8](Soedol, 2004), [7](Zhang and Cheng, 2006), [6](Tan, 1998)

وغيرهم من الباحثين.

يعد سلوك المنشآت القشرية تحت تأثير الأحمال الزلزالية معقد. و يتأثر بعوامل مختلفة أهمها السمات والخصائص المعمارية بالإضافة إلى خصائص المواد وطبيعة الزلازل التي تتعرض لها. وفي كثير من الأحيان تكون استجابة هذه القباب فريدة بسبب شكلها وخصائص توزيع الأحمال.

توزع الهياكل القشرية التي تأخذ شكل قبة الأحمال بشكل أولي من خلال اجهادات الضغط وهو أمر موافق لهيكليتها وشكلها، ومع ذلك فإنه وأثناء الأحداث الزلزالية التي يمكن أن تتعرض لها، فإن الحمل الزلزالي يعمل أفقياً وبالتالي يمكن أن يحفز إجهادات الشد والقص التي قد تؤدي لخلق تشققات أو حصول الفشل، إذا لم تكن القبة مصممة بشكل قادر على الصمود أمام هذه الحملات [9].

والعوامل التي تؤثر على الأداء الزلزالي للقشريات هي هندسة القشرية وأبعادها، حيث يؤثر هذا التكوين الهندسي على الاستجابة للحمل الزلزالي. مثل نسبة الارتفاع إلى الامتداد حيث عندما تكون هذه النسبة أقل تعطي أداء زلزالي أفضل بسبب إمكانية توزيع الأحمال عبر أسطحها بشكل أكثر فعالية [10].

كذلك تعد أنظمة الدعم من العوامل المساعدة و التي ترفع أداء هياكل المنشآت القشرية وتعزز من الأداء الزلزالي لها. مثل الدعامات والجوائز والتي من الممكن أن تمنع الانهيار بتأثير الزلازل [11]. ولدى مراجعة العديد من الدراسات المرجعية تبين وجود آليات انهيار معقدة لهياكل القباب والمنشآت القشرية يمكن أن نذكر منها.

الدفع الخارجي: تحدث هذه الآلية أثناء الاهتزاز الزلزالي، حيث تتعرض هذه الهياكل للدفع الخارجي و تحدث عندما تكون قاعدة القشرية أو نظام الدعم في حال استخدامه غير كافي [12]. تشققات الشد في أثناء الهزات من الممكن أن تتولد قوى شادة تؤدي لحصول التشقق على طول القشرية والتي تعرض سلامة الهيكل للخطر [12].

تظهر القباب الخرسانية سلوكاً معقداً يتأثر بعوامل مختلفة تحت تأثير الأحمال قصيرة وطويلة الأمد، وتتأثر القباب الخرسانية واستجاباتها بخصائص المواد الهندسية وتأثيرات الزحف [13].

من خلال هذا البحث سوف نقدم مساهمة في دراسة السلوك الديناميكي للقشريات الكروية من الخرسانة المسلحة وتأثيرات اختلاف النسبة $\frac{R}{T} = \frac{\text{نصف قطر القشرية}}{\text{سماعة القشرية}}$ على الخصائص الديناميكية لهذه المنشآت مثل دور المنشأة والانتقال الأعظمي الحاصل وغيرها.

إن حصول زلزال ٦ شباط عام ٢٠٢٣ وآثاره جعل من الضروري الاهتمام بالدراسات الزلزالية، وأننا لسنا بمأمن عن إمكانية حصول زلازل أخرى. وكذلك فإن سوريا مقبلة على مرحلة جديدة من إعادة الإعمار من

الممكن أن تكون فيها القشريات هي أحد المنشآت المستخدمة في المعارض والقاعات الجوامع والكنائس، التي من الممكن أن تستخدم لذلك لا بد لنا من فهم واضح لسلوك هذه المنشآت تحت تأثير الحمولات الزلزالية.

٢- الدراسة المرجعية:

يعد فهم سلوك القشريات الكروية تحت تأثير الحمولات الزلزالية من الموضوعات الهامة والتي تجذب بعض الباحثين سنستعرض بعض الدراسات التي بحثت في هذا المجال.

قام (Zarghamee et al, 2020) [14] بإجراء تحليل على عشر نماذج من القبة البيتونية المسلحة بأقطار (٣٠,٩١,٤٤,٧٦,٢) متر . وبنسب قطر إلى ارتفاع مختلفة ، قام الباحث بدراسة الانبعاج في هذه النماذج، الحالة الأولى بتأثير الأحمال الشاقولية، وثم آثار الزحف والانكماش ثم تطبيق حمولات الزلازل عليها وكانت هذه النماذج مصممة من أجل أحمال شاقولية فقط . استخدم الباحث برنامج الـ ABAQUS لتحليل هذه النماذج. اعتمد الباحث على نماذج حقيقية تستخدم كغطاء لخزانات، واستنتج الباحث من خلال هذه الدراسة أن هذه النماذج ومن خلال تصميمها الذي يعتمد على الأحمال الشاقولية فقط، وكون المناطق الموجودة فيها ليست خطرة زلزالياً فإنه يمكنها تحمل الأحمال الزلزالية التي من المتوقع أن تتعرض لها. أما من أجل المناطق الأكثر خطورة زلزالياً فإنه يتوجب أن تكون ذات سماكة أكبر لتلبية الاستجابة الطيفية للتصميم.

كذلك الباحث (Mohammed et al, 2008) [15] قام بدراسة شملت القبة الكروية والقطعية المكافئة تحت تأثير الحمولات الزلزالية وذلك في دولة الإمارات العربية المتحدة. اعتمد الباحث على مقارنة القبة الكروية من الخرسانة المسلحة وتأثير اختلاف مجاز (Span) هذه القباب مع سماكة هذه القباب. شملت هذه الدراسة المقارنة في الخصائص الديناميكية (تردد الاهتزاز فقط)، شملت الدراسة النماذج التالية (قبة بأبعاد ١٣,٧م وارتفاع ٦,٨٥م) وتغيير في السماكة النوع الثاني كان لنماذج بسماكة ثابتة ومجاز متغير (٧,١٣- ١٦م) وبارتفاع ثابت ١٣,٦م. خلصت الدراسة إلى أن زيادة سماكة القبة يزيد من دورها، زيادة ارتفاع القبة يقلل من التردد الحاصل فيها.

كذلك (Hamood and Jawad, 2023) [16] تبحت الدراسة في الأداء الزلزالي لقشريات الأسقف الأسطوانية الخرسانية الرقيقة، والتي أظهرت مرونة جيدة للزلازل بسبب طبيعتها خفيفة الوزن وكفاءتها البنيوية. يركز البحث على قشريات خرسانية بسبك ٨ سم مع مجاز يقل عن ٣٠ متراً، مما يدل على أن صلابتها الهندسية العالية وكتلتها المنخفضة تؤدي إلى ترددات تتجاوز تلك الخاصة بالأحداث الزلزالية النموذجية. تؤدي هذه الخاصية إلى سلوك مرن تحت تأثير الزلازل. تكشف الدراسة أن القشريات تتعرض لإجهاد أكبر نتيجة هزات الزلازل الرأسية مقارنة بالأفقية.

وأيضاً (Makhloof et al, 2023) [17] تبحت الدراسة في الاستجابة الزلزالية لأسقف الخرسانة المسلحة ذات القشرة المنحنية المزدوجة (DCS) باستخدام كل من التحليل الديناميكي الخطي (LDA) والتحليل الديناميكي غير الخطي (NLDA). طور الباحثون خوارزمية تصميم مبتكرة تعتمد على العناصر المحدودة لتحديد التسليح الفولاذية لـ NLDA. وجدت الدراسة أن أسقف DCS تتأثر بهزات الزلازل الرأسية أكثر من الأفقية. كشف NLDA عن أضرار جسيمة وإزاحة عالية تحت تأثير الزلازل القوية، والتي فشل LDA في الحصول عليها. كما قام الباحثون بتحليل تأثيرات انحناء القشريات وتغير السُمك على الانهيار. أدى زيادة انحناء القشريات إلى انخفاض في نسبة الطلب إلى السعة وإجهاد فولاذ التسليح، مما قد يؤدي إلى تغيير حالة القشريات

من الانهيار الأولي إلى المرونة. كان لتغير السمك تأثير ضئيل على السلوك العام. تختتم الدراسة باقتراح صيغة جديدة للنتبؤ بالأضرار الناجمة عن الزلازل في أسقف *DCS*، مما يساهم في فهم أكثر شمولاً لسلوكها الديناميكي في ظل ظروف الزلازل.

(Pathak and Khare, 2020) [18] أجرى الباحث دراسة تحليلية على قشرية خرسانية مسلحة نصف قطرها ٢٥,٤٥م تغطي مساحة ٤٠م^٢ وسمكها ١٥سم بزوايا خمسين درجة مدعومة جوائز حلقية وأعمدة بارتفاع ١٢م تحت تأثير الأحمال الزلزالية. وأجرى الباحث تحليلاً ستاتيكيًا وديناميكيًا على النموذج المعتمد باستخدام برنامج *SAP2000*. و أجرى الباحث التحليل الستاتيكي باستخدام ٦٣ تراكب، والتحليل الديناميكي باستخدام طيف الاستجابة باستخدام ١٥١ تراكب. وضع الباحث معايير قوة القص والانتقالات القصوى والقوى الداخلية والإجهادات المتولدة. درس الباحث ٥٠ نمط اهتزاز ووجد أن أهم الأنماط هي ١٢ و ١٣ و ٠٩. وجد الباحث أن قوة القص المحسوبة بنفس الطريقة الديناميكية قد تم التوصل إليها بالتحليل الاستاتيكي، وكانت مساهمة الكتلة في اتجاه *X* هي نفسها في اتجاه *Y*. وأشار الباحث إلى أن أقصى إزاحة حصل عليها كانت ٠,٠٠٢ م في اتجاه *X*، و ٠,٠٠٨ م. في اتجاهي *Y* و *Z*، وهي أقل من الإزاحة المسموح بها حسب (*ISI1983:2002*) والتي تم تحديدها على أنها: ٠,٠٠٤ * ارتفاع السقف.

٣- مشكلة البحث:

تعتبر القشريات الكروية من البيوتون المسلح من المنشآت الهامة والتي قد تتعرض للحمولات الزلزالية، ولما تتمتع به منطقتنا من أخطار زلزالية، لا بد من الدراسة والتعمق بموضوع سلوك هذه المنشآت بتأثير الأحمال الزلزالية، والمعرفة المتعمقة حول هذا السلوك وقدرتها على مقاومة الأحمال الزلزالية وذلك من خلال معرفة كيفية الاستجابة لهذه الحمولات، ومعرفة دور المنشأة والتشوهات الحاصلة والقوى الداخلية المتولدة وماهي المناطق الحرجة والأكثر عرضة للأضرار فيها وأين أماكن الانتقال الأعظمي الحاصلة وعلاقة النسبة $\frac{R}{T}$ نصف قطر القشرية في كل منها. سماكة القشرية

٤- هدف البحث:

مساهمة في فهم سلوك القشريات تحت تأثير الحمولات الزلزالية من خلال معرفة كيفية استجابة هذه المنشآت بمعرفة دور المنشأة والقوى الداخلية المتولدة وقوة القص والمناطق الحرجة الأكثر عرضة للضرر والانتقال الأعظمي الحاصل وعلاقة النسبة $\frac{R}{T}$ نصف قطر القشرية سماكة القشرية معها.

٥- منهجية البحث :

في بحثنا هذا سوف نعتمد على نموذج قشرية كروية تخضع لحمولات شاقولية مبيتة $200kg/m^2$ وحمولة حية تقدر بـ $200kg/m^2$ تستند على جائز دائري الذي يستند بدوره على ثمانية أعمدة لتشكل معاً الهيكل الحامل للقشرية.

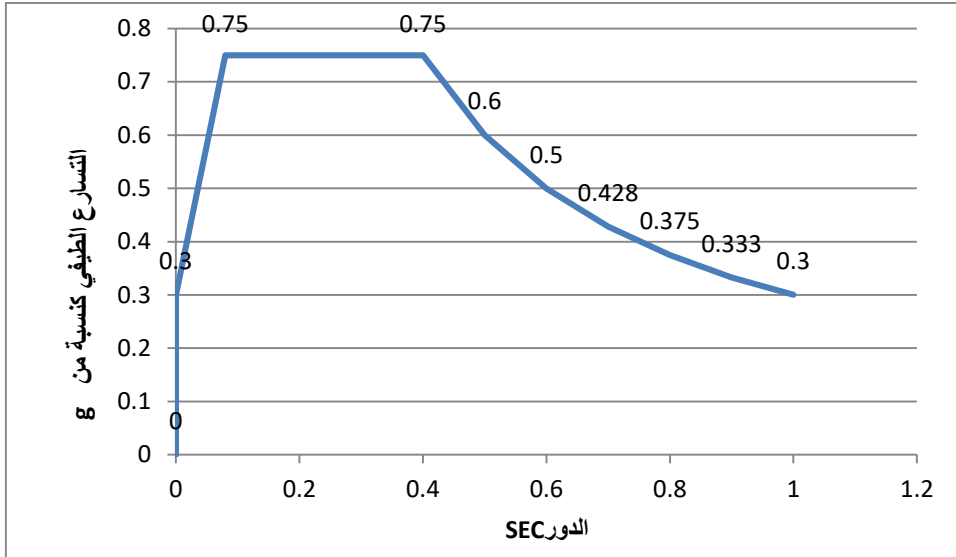
سوف يتم اعتماد دراسة السلوك بتأثير الحمولات الزلزالية من خلال تطبيق الحمولة الزلزالية بطريقة طيف الاستجابة من خلال اعتماد طيف الاستجابة الموافق للمنطقة المدروسة (محافظة اللاذقية) المنطقة الزلزالية الثالثة بحيث معامل المنطقة الزلزالية وفق الكود العربي السوري، تم تثبيت المعاملات الخاصة بالتربة للتمكن من انجاز البحث، اعتمدنا الصنف *SB* لتكون موضوع دراستنا.

$C_a = 0.30, C_v = 0.3$ ، المعامل الزلزالي، صنف التربة $SB, Z = 0.3$,

$$T_s = \frac{C_v}{2.5C_a} = 0.4sec, T_a = 0.2 * T_s = 0.08sec$$

وكذلك فإن T_s, T_a هي أدوار التحكم.

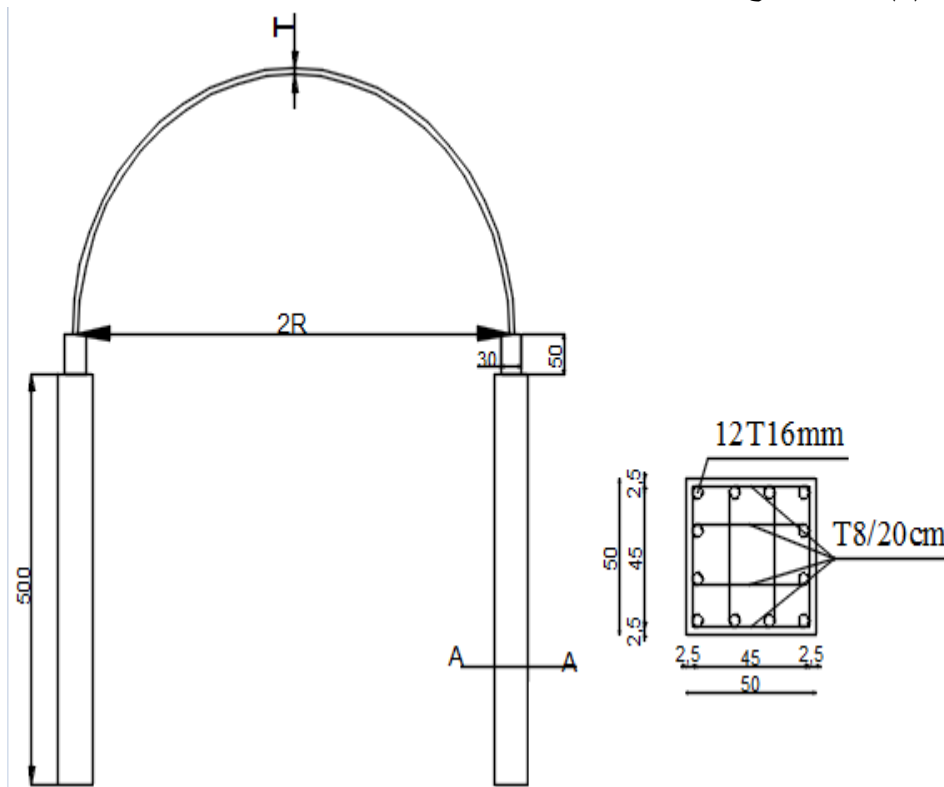
فيصبح طيف الاستجابة كما هو مبين بالشكل.



الشكل (٢) طيف الاستجابة التصميمي

سوف يتم استخدام برنامج $SAP2000$ لنمذجة القشرية وتطبيق طيف الاستجابة وإجراء عملية التحليل عليها.

يبين الشكل (٣) شكل النموذج المدروس:



الشكل (٣) النموذج المدروس

سوف يتم اعتماد بارامترات نسبة نصف قطر القشرية إلى سماكتها وبالتالي النماذج التي سيتم دراستها موضحة بالجدول (١)

الجدول (١) النماذج التي ستتم دراستها

العينه	السماكة (T) سم	النسبة $\frac{R}{T}$	قيمة (R) م
١	٨	٨٠	٦,٤
٢	٨	٩٠	٧,٢
٣	٨	١٠٠	٨
٤	١٠	٨٠	٨
٥	١٠	٩٠	٩
٦	١٠	١٠٠	١٠
٧	١٢	٨٠	٩,٦
٨	١٢	٩٠	١٠,٨
٩	١٢	١٠٠	١٢

٦- الدراسة التحليلية :

تمت عملية بناء النموذج وفقاً للطريقة المتبعة في دراسة مقال (Pathak et al, 2020) [18] حيث عملية النمذجة وفقاً لبرنامج SAP2000 وتمت عملية توثيق النموذج مع مقال (Pathak et al, 2020) [18].

تم توثيق النموذج العددي المعتمد في هذه الدراسة من خلال مقارنته مع النموذج المنشور في دراسة (Pathak et al, 2020) [18]، والتي تناولت التحليل الخطي الاستاتيكي والديناميكي لقبة خرسانية مسلحة نصف كروية تحت تأثير الأحمال الزلزالية باستخدام برنامج SAP2000. اعتمد النموذج المرجعي على قبة نصف كروية بقطر خارجي ١٢ متراً وارتفاع ٥,٤ متر، وسماكة قشرية ١٥٠ ملم، من خرسانة من النوع M25 ذات معامل مرونة 25×10^6 كيلو باسكال، وكثافة ٢٥ كيلو نيوتن/م^٣، ونسبة بواسون ٠,٢. تم تثبيت القاعدة تثبيثاً تاماً (Fixed Supports)، مع تطبيق الأحمال الزلزالية وفق طريقتي التحليل الاستاتيكي المكافئ وتحليل طيف الاستجابة، وبالاعتماد على الكود الزلزالي الهندي IS:1893-2002.

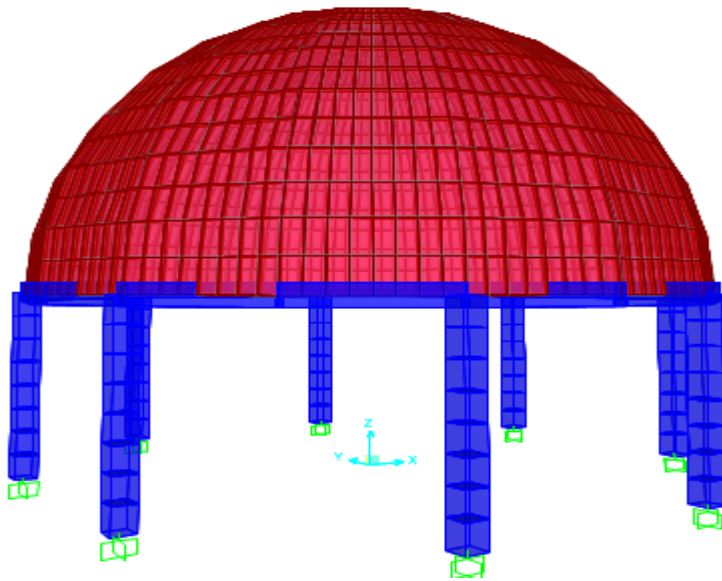
تم استخدام المعاملات الزلزالية التالية:

• معامل المنطقة الزلزالية (Z = 0.24)

• معامل الأهمية I=1.

بالنسبة لظروف التربة، فقد تم اعتماد تربة من النوع (Type II) بحسب تصنيف IS:1893-2002، وهي تربة متوسطة الكثافة. ويتوافق هذا النوع من التربة بشكل تقريبي مع التصنيف SB المستخدم في كودات الزلازل الأمريكية (NEHRP/IBC).

أظهرت نتائج النموذج المرجعي قوة قص قاعدية تصل إلى ٢٥٠,٧٢ كيلو نيوتن، وإزاحة رأسية قصوى تبلغ ٣,٢٢ ملم، وتردد طبيعي أساسي ٣,١٨ هرتز. وقد أظهر النموذج العددي في هذه الدراسة تقارباً جيداً مع هذه النتائج، مما يعزز موثوقيته في تمثيل السلوك الزلزالي للقبة الخرسانية المسلحة. من خلال قيم القص والعزم الاعظمي لنفس النموذج على طول ارتفاع القشرية والشكل المتشوه والتي كانت متطابقة تماماً. وبناء عليه تمت نمذجة العينات السابقة باستخدام برنامج SAP2000 ووفق المعطيات السابقة من خلال تعريف العناصر وتعريف الحملات الشاقولية ثم طيف الاستجابة الذي سيخضع لها النموذج، فتم الحصول على النموذج الموضح بالشكل (٤).

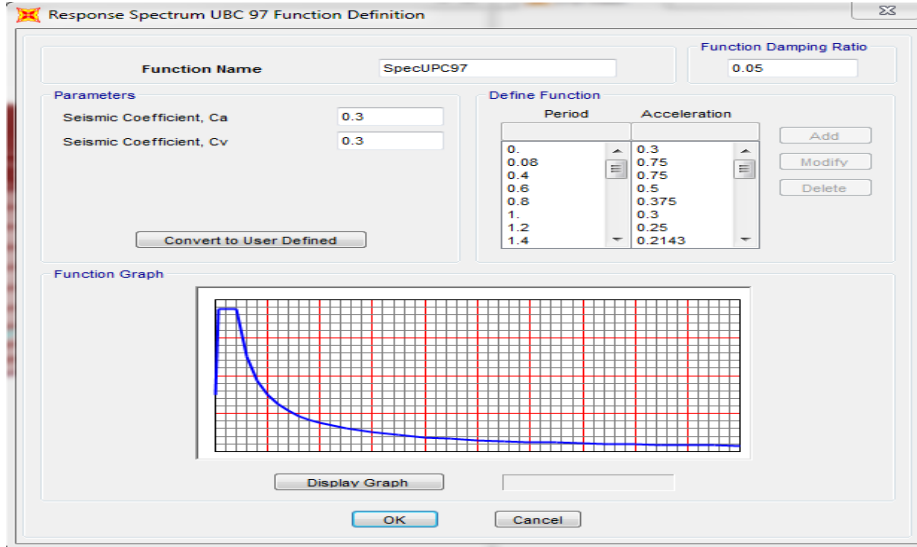


الشكل (٤) النموذج باستخدام برنامج SAP2000

من خلال عملية تحليل النموذج الأول وفق المعطيات التالية:

رقم العينة	السماعة (T) سم	النسبة $\frac{R}{T}$	قيمة (R) م
١	٨	٨٠	٦,٤

ويتطبيق الحملات الشاقولية وطيف الاستجابة الموضح بالشكل (٥)



الشكل (٥) طيف الاستجابة المطبق على النماذج

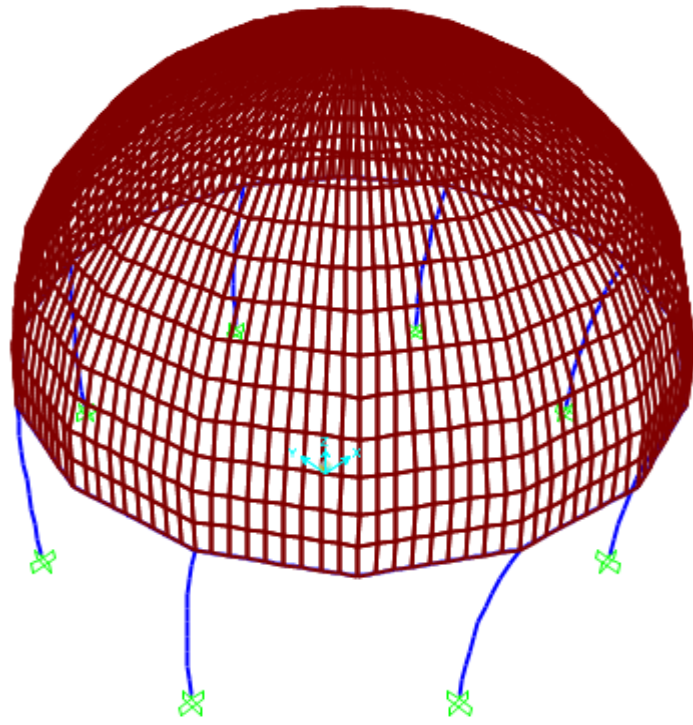
وبتحليل النموذج الأول كانت النتائج كما هو موضح في الجدول (٢):

الجدول (٢) نتائج النموذج الأول وأدوار أنماط هذا النموذج

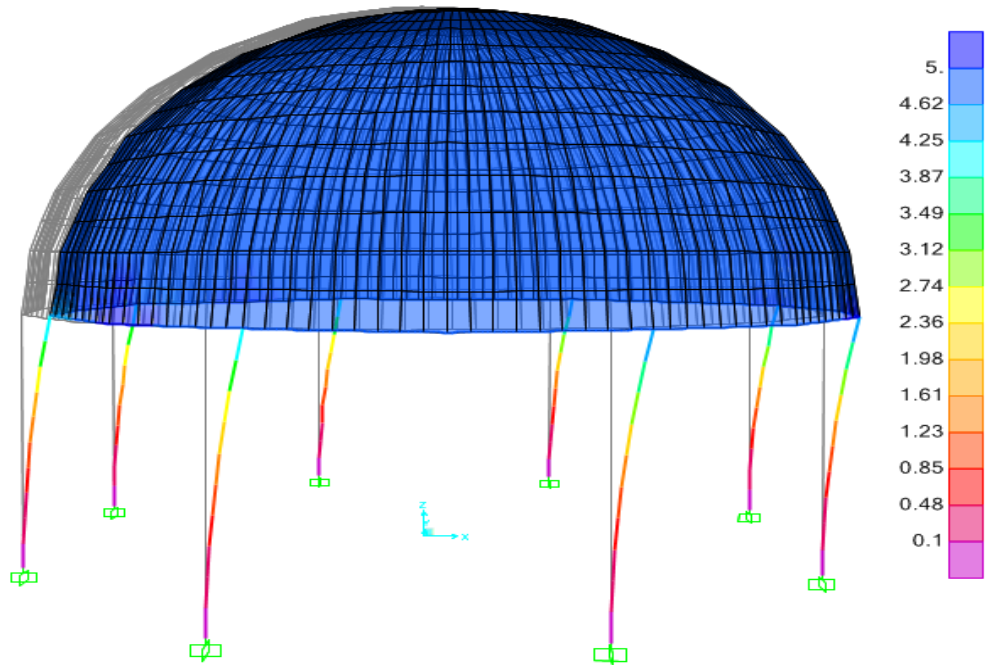
النمط	الدور $T(sec)$	نوع النمط	نسبة مساهمة النمط التراكمية
١	٠,٤٠١	انسحابي	٠,٩٧
٢	٠,٤٠١	انسحابي	١
٣	٠,٠٤٥	فتلي	١
٤	0.043	فتلي	١
٥	0.024	انسحابي	١
٦	0.024	انسحابي	١
٧	0.024	انسحابي	١
٨	0.043	انسحابي	١

دور المنشأة هو $T = 0.401sec$ وكان النمط الأول هو النمط المسيطر وهو نمط انسحابي وكانت نسبة مساهمة هذا النمط هي ٩٧% وقوة القص المؤثرة على هذا النموذج تساوي (89.6KN).

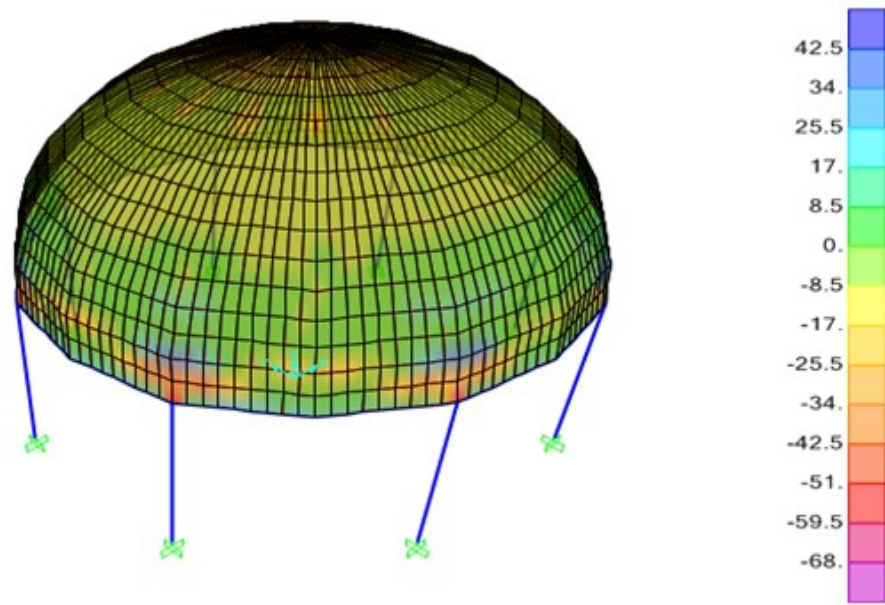
ويبين الشكل (٦) شكل النمط الأول للنموذج الأول المدروس.



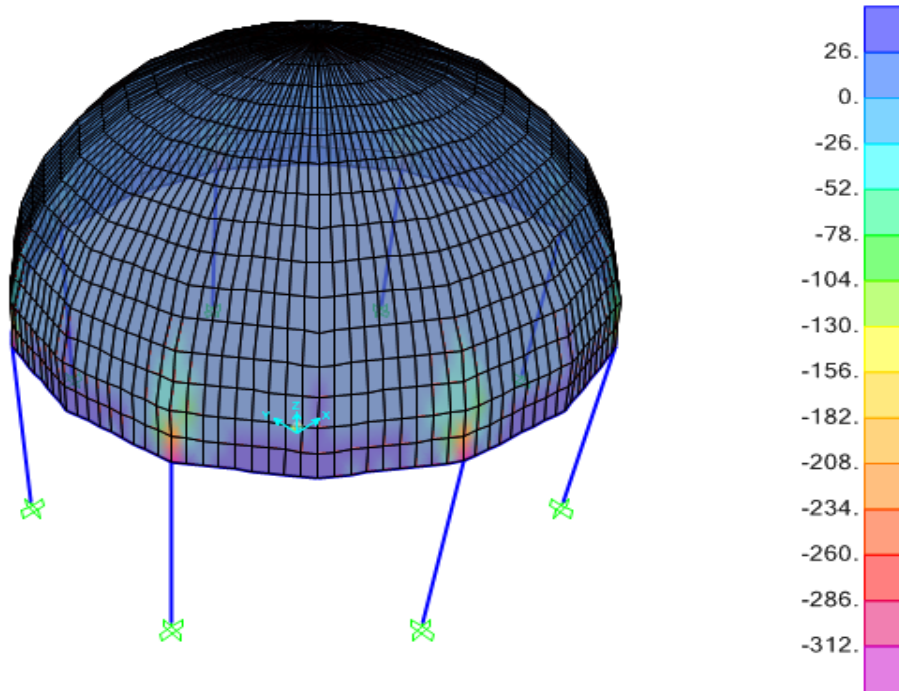
الشكل (٦) النمط الأول للنموذج الأول المدروس
ويبين الشكل (٧) الانتقال الأعظمي الحاصل في النموذج الأول المدروس.



الشكل (٧) الانتقال الأعظمي الحاصل في النموذج الأول المدروس
نلاحظ من خلال الشكل (٧) والشكل (٨) أن الانتقال الأعظمي الحاصل في القشرية يكون في
سطح تماس القشرية مع الجائز الحلقية، حيث نلاحظ من خلال المقطع الشاقولي في الشكل (٨) أن



الشكل (٩) القوى الداخلية الحلقية (المحيطية) F11 في القشرية



الشكل (١٠) توزيع القوى الداخلية الطولية F22 في القشرية

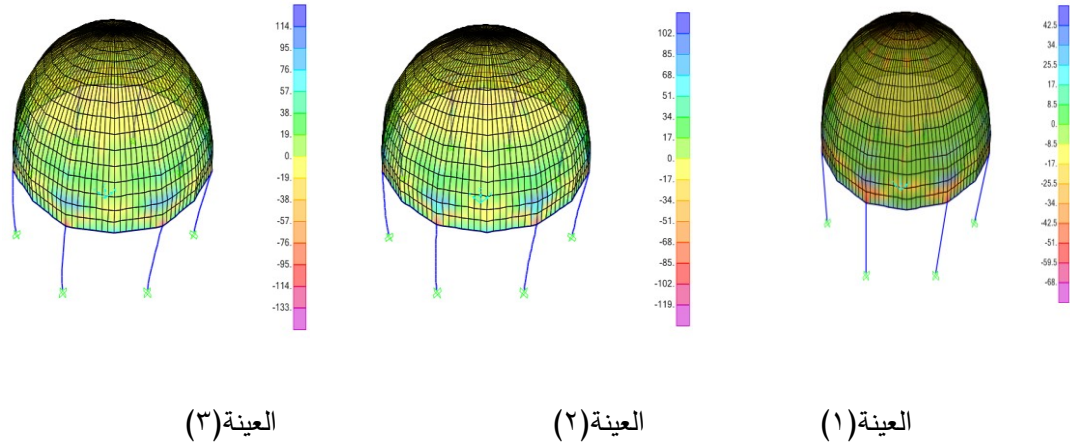
وبتحليل بقية النماذج مثل النموذج الأول تم التوصل للنتائج المبينة في الجدول (٣) :

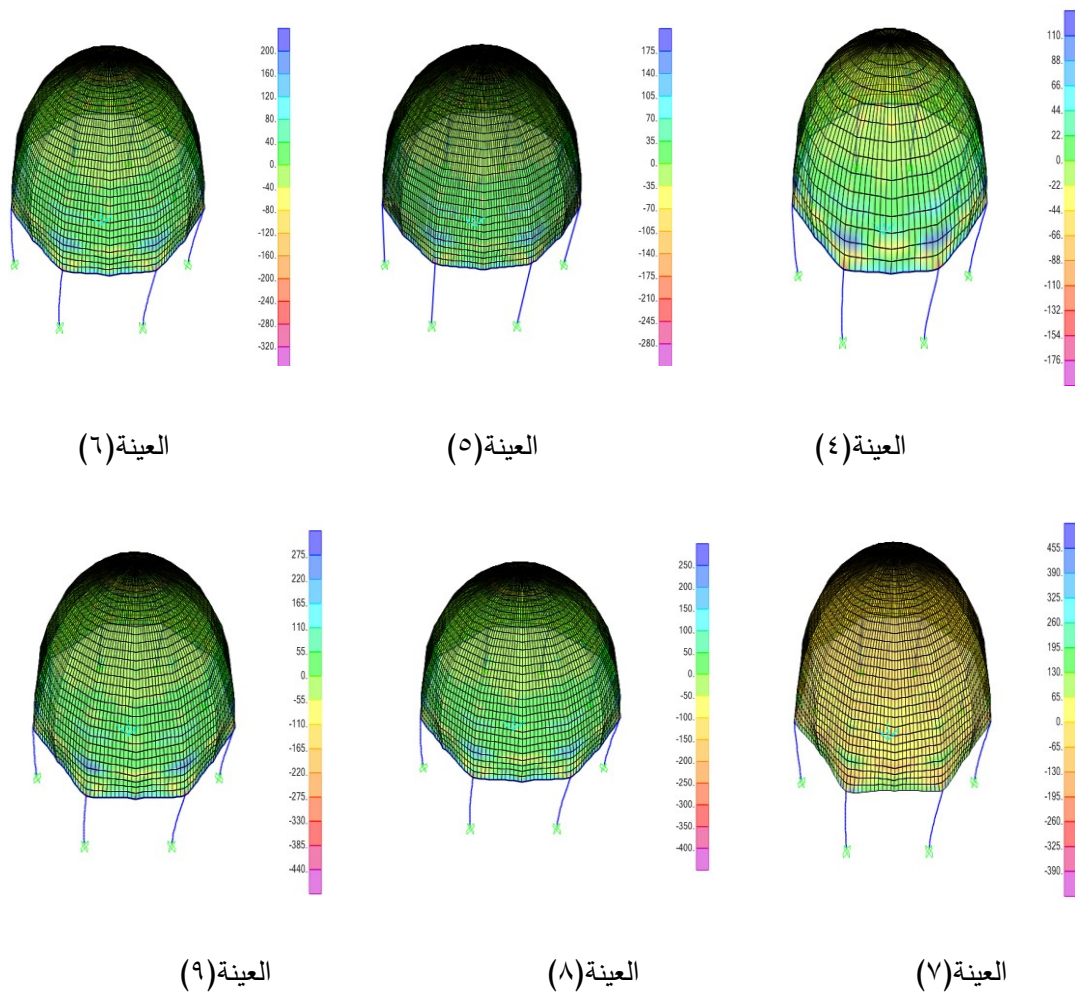
الجدول (٣) نتائج النماذج التي تم تحليلها

نوع النمط	مساهمة الكتلة	النمط الأخطر	قيمة الدور sec	قيمة الانتقال الأعظمي (mm)	قيمة القص القاعدي (KN)	قيمة (R)	النسبة $\frac{R}{T}$	السماكة cm	العينة
انحسابي	%٩٧	١	٠,٤	٥,٢٥	٨٩,٦	٦,٤	٨٠	٨	١
انحسابي	%٨٥	١	٠,٤٩	٧,٧٦	١٧٧,٥	٧,٢	٩٠	٨	٢
انحسابي	%٨٩	١	٠,٥٤٢	٩,١٩	٢٠٠,٦	٨	١٠٠	٨	٣
انحسابي	%٧٩	١	٠,٥٣٩	١٠,٦٣	٢٢٠	٨	٨٠	١٠	٤
انحسابي	%٩٩	١	٠,٦٤	١٢	٢٤٥	٩	٩٠	١٠	٥
انحسابي	%٩٦	١	٠,٧٠	١٥,١٥	٢٩٢,٦	١٠	١٠٠	١٠	٦
انحسابي	%٩٤	١	٠,٧٠٨	١٤,٦	٣٠٣,٣	٩,٦	٨٠	١٢	٧
انحسابي	%٩٧	١	٠,٧٩٤	١٨,٩٣	٣٥٣,٦	١٠,٨	٩٠	١٢	٨
انحسابي	%٩٣	١	٠,٨٨	٢٣,٨٩	٤٠٦,٢٥	١٢	١٠٠	١٢	٩

من خلال الجدول (٣) نلاحظ أن النمط المسيطر هو النمط الأول وقد كان محققاً لنسبة مساهمة الكتلة %٩٠ في النماذج جميعها عدا العينة الرابعة حيث حقق نسبة مساهمة الكتلة في النمط الثاني وهو أيضاً انحسابي.

يبين الشكل (١١) مقارنة بين النماذج المدروسة من حيث توزيع القوى الداخلية الحلقية F_{II} .





الشكل (١١) مقارنة بين النماذج المدروسة من حيث توزيع القوى الداخلية الحلقية F11

من خلال المقارنة بين المجموعات (١، ٤، ٧)، (٢، ٥، ٨)، و(٣، ٦، ٩)، حيث تضم كل مجموعة عناصر ذات نفس النسبة R/T (نسبة نصف قطر القبة إلى سماكتها)، يمكن ملاحظة أن نمط توزيع القوى الحلقية متشابه داخل كل مجموعة، مما يعكس أن الشكل الهندسي هو العامل الأساسي المسيطر على نمط الانتشار.

إلا أن هناك ازدياداً تدريجياً في شدة هذه القوى بين العينات داخل كل مجموعة، ما يشير إلى استجابة ديناميكية أعلى عند تغيير ظروف الحمل أو الخصائص المادية.

عند التركيز على نقاط التماس بين القبة والهيكल الحامل، وتحديدًا الجائز الحلقية والأعمدة، نلاحظ أن هذه المناطق تشهد أكبر تركيز للقوى الحلقية، وهي بالتالي تمثل مواقع الاجهاد الأعظمي والانتقالات الأكبر ضمن النموذج.

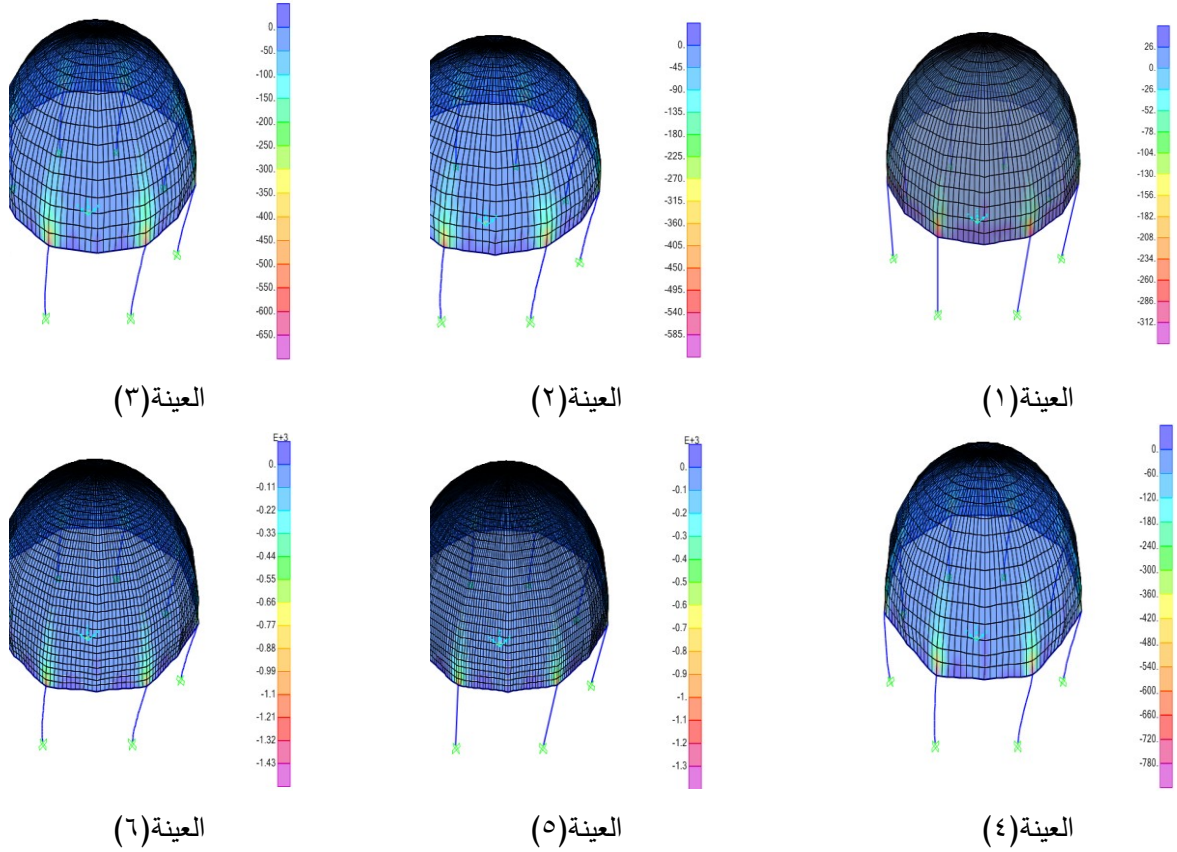
يعود ذلك إلى تراكم القوى الأفقية الناجمة عن الزلازل مع ردود الفعل العمودية عند الدعم، مما يؤدي إلى تراكم إجهادات على محيط القبة السفلي، تحديدًا عند نقاط نقل الأحمال إلى الأعمدة.

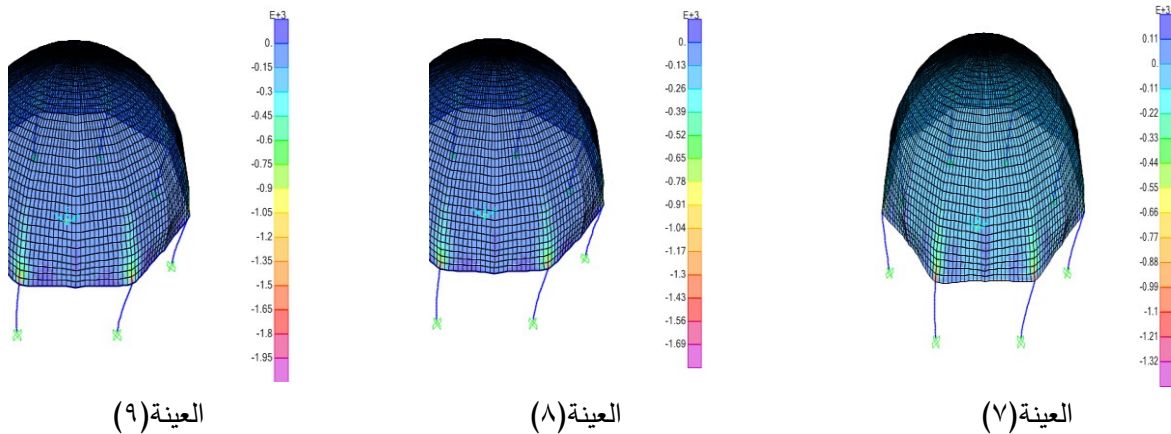
علاوة على ذلك، عند مقارنة المجموعات (١، ٢، ٣)، (٤، ٥، ٦)، و(٧، ٨، ٩)، والتي تمثل عينات مختلفة بنسبة R/T متصاعدة، يمكن بوضوح ملاحظة تزايد في قيمة القوى الحلقية المتولدة نتيجة الأحمال الزلزالية مع ازدياد هذه النسبة.

فكلما ازدادت نسبة نصف القطر إلى السماكة، أصبحت القبة أكثر "مرونة هندسية" وقلَّ مقاومتها النسبية لتشوهات القشرة، مما ينعكس في ارتفاع القوى الحلقية كوسيلة ذاتية لتعويض التشوهات الزلزالية العرضية.

بالرغم من هذا التزايد في شدة القوى، يظل نمط انتشارها وتوزيعها داخل القبة محتفظاً بتشابهه هندسي مع الحالة الأساسية (النموذج الأول)، مما يعزز من فرضية أن التوزيع الأساسي للقوى الحلقية تحكمه بشكل رئيسي الهندسة الكروية والحدود الإنشائية أكثر من التغيرات النسبية في الأحمال، بينما تحدد النسبة R/T شدة تلك القوى فقط.

ويمكننا أيضاً أن نستنتج من ذلك زيادة القوى الداخلية الحلقية مع زيادة قوة القص المتولدة نتيجة الحمولة الزلزالية المطبقة على العينات.





الشكل (١٢) مقارنة بين النماذج المدروسة من حيث توزيع القوى الداخلية الطولية F22

يبين الشكل (١٢) توزيع القوى الداخلية الطولية للنماذج التسعة حيث نلاحظ من خلال المقارنة بين المجموعات (١، ٤، ٧)، (٢، ٥، ٨)، و(٣، ٦، ٩)، حيث تحتوي كل مجموعة على عينات ذات نفس النسبة R/T (نسبة نصف قطر القبة إلى سماكتها)، يُلاحظ أن نمط توزيع القوى الحلقية يبقى متشابهًا داخل كل مجموعة، مما يشير إلى أن الشكل الهندسي هو العامل الرئيسي الذي يؤثر في نمط انتشار هذه القوى. ومع ذلك، يظهر زيادة تدرجية في شدة هذه القوى بين العينات ضمن كل مجموعة، مما يدل على استجابة ديناميكية متزايدة مع تغير ظروف الحمل أو الخصائص المادية للهيكـل.

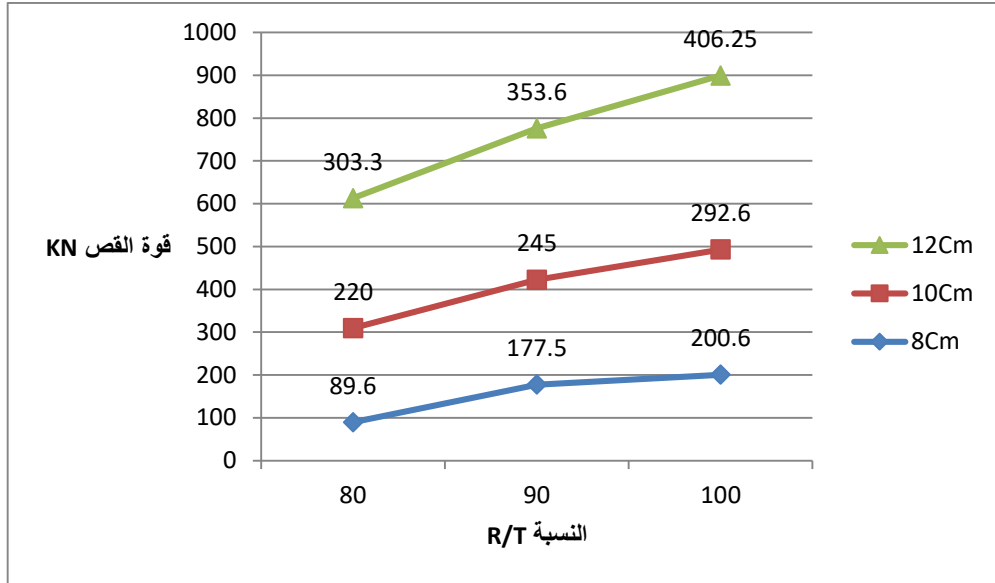
عند التركيز على نقاط التماس بين القبة والهيكـل الحامل، تحديداً الجائز الحلقي والأعمدة، نلاحظ أن هذه المناطق هي التي تشهد أكبر تركيز للقوى الحلقية، مما يجعلها تمثل نقاط الإجهاد الأعظم والانتقالات الأكبر ضمن النموذج. هذا يعود إلى تداخل القوى الأفقية الناتجة عن الحمولات الزلزالية مع ردود الفعل العمودية عند نقاط الدعم، مما يؤدي إلى تراكم الإجهادات على محيط القبة السفلي، خصوصاً عند النقاط التي تُثقل منها الأحمال إلى الأعمدة.

عند مقارنة المجموعات (١، ٢، ٣)، (٤، ٥، ٦)، و(٧، ٨، ٩)، والتي تحتوي على عينات ذات نسب R/T متزايدة، يمكن ملاحظة بوضوح تزايد في قيمة القوى الحلقية الناتجة عن الحمولات الزلزالية مع ارتفاع هذه النسبة. كلما زادت نسبة نصف القطر إلى السماكة، زادت مرونة القبة الهندسية، مما يؤدي إلى تقليل مقاومتها النسبية للتشوهات، وبالتالي زيادة القوى الحلقية كوسيلة لتقليل التأثيرات الزلزالية العرضية.

رغم هذا التزايد في شدة القوى، يظل نمط توزيع القوى الحلقية داخل القبة محتفظاً بخصائصه الهندسية الأصلية، مما يعزز فرضية أن التوزيع الأساسي لهذه القوى يتم تحديده في المقام الأول بواسطة الهندسة الكروية والحدود الإنشائية أكثر من التغيرات في الأحمال. إلا أن النسبة

R/T تحدد فقط شدة هذه القوى. كما يمكن الاستنتاج من هذه المقارنات أن زيادة القوى الداخلية الحلقية تتوازي مع الزيادة في قوى القص الناجمة عن الحمولات الزلزالية المطبقة على العينات ويمكننا أيضاً أن نستنتج من ذلك زيادة القوى الداخلية الحلقية مع زيادة قوة القص المتولدة نتيجة الحمولات الزلزالية المطبقة على العينات.

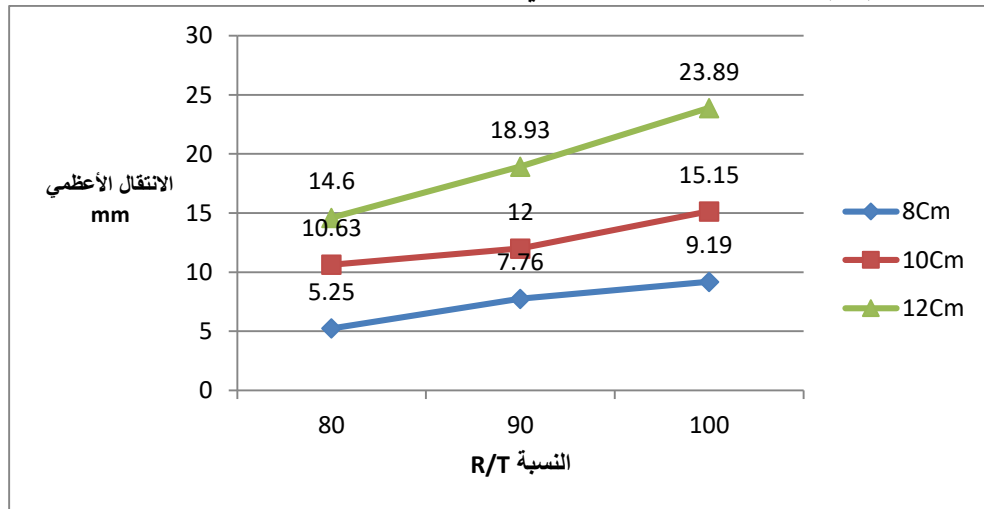
برسم العلاقة بين قوة القص والنسبة $(\frac{R}{T})$ وذلك للعينات التسعة نحصل على الشكل (١٣):



الشكل (١٣) العلاقة بين قوة القص والنسبة R/T للعينات المدروسة

نلاحظ من خلال الشكل (١٣) أن قوة القص تزداد بزيادة النسبة $\frac{R}{T}$ وذلك من أجل السماكة نفسها وكانت هذه الزيادة بنسبة ٩٨% عند الانتقال من النسبة ٨٠ إلى النسبة ٩٠ والسماكة ٨cm في حين انخفضت هذه الزيادة إلى ١١,٣% من أجل السماكة 10cm ومن أجل نفس النسبة، وكانت الزيادة ١٦% من أجل نفس الزيادة بالنسبة ولكن من أجل سماكة 12cm. قد يكون جزء من الزيادة في قوة القص هو بسبب زيادة مساحة السطح الأفقي لها وزيادة نصف القطر الذي يؤدي لحمولات إضافية والتي تولد قوة قص أكبر. من أجل زيادة النسبة من ٩٠ إلى ١٠٠ كانت زيادة قوة القص ١٣% من أجل السماكة 8cm، ١٩% من أجل السماكة 10cm، و ١٥% من أجل السماكة 12cm.

من أجل العينة الثالثة والرابعة لهما نفس نصف القطر 8m لكن تختلفان بالسماكة (8cm, 10cm) على التوالي نلاحظ أن قوة القص لهما هي (200.6, ٢٢٠) KN على التوالي. وبالتالي قوة القص زادت مع زيادة السماكة من 8cm إلى 10cm بنسبة ٩% على الرغم من بقاء نصف القطر نفسه. ويبين الشكل (١٤) العلاقة بين الانتقال الأعظمي والنسبة R/T للعينات المدروسة.

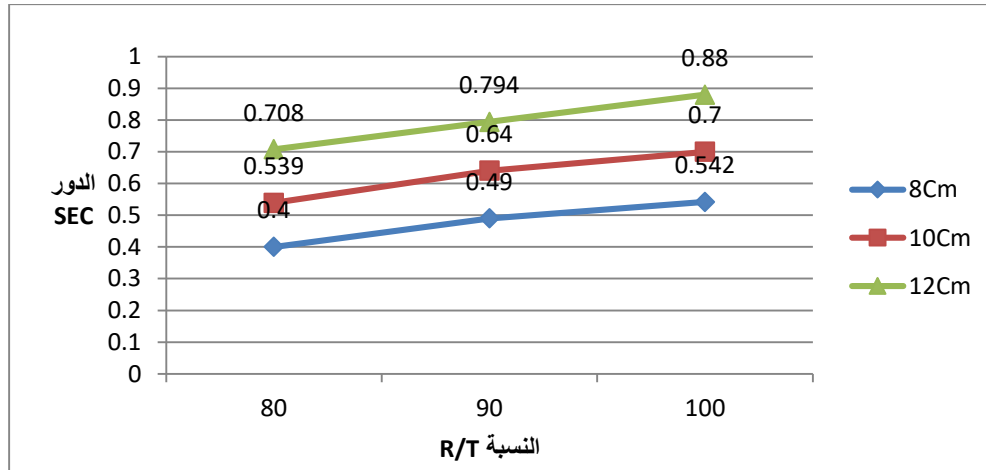


الشكل (١٤) العلاقة بين الانتقال الأعظمي والنسبة R/T للعينات المدروسة

نلاحظ من خلال الشكل (١٤) أن الانتقال الأعظمي يزداد بزيادة النسبة $\frac{R}{T}$ وذلك من أجل السماكة نفسها وكانت هذه الزيادة بنسبة ٤٨% عند الانتقال من النسبة ٨٠ إلى النسبة ٩٠ والسماكة ٨cm، في حين انخفضت هذه الزيادة إلى ١٢,٩% من أجل السماكة 10cm ومن أجل نفس النسبة، وكانت الزيادة ٢٩,٦% من أجل سماكة 12cm.

وعند زيادة النسبة من ٩٠ إلى ١٠٠ كانت زيادة الانتقال الأعظمي ١٨,٤% من أجل السماكة 8cm، وكانت ٢٦,٢% من أجل السماكة 10cm، و ٢٦,٢% من أجل السماكة 12cm.

في حين أن العينة الثالثة والرابعة لهما نفس نصف القطر 8m لكن تختلفان بالسماكة (8cm, 10cm) على التوالي نلاحظ أن الانتقال الأعظمي لهما هي (9.19 و 10.63) mm على التوالي. وبالتالي الانتقال الأعظمي زاد مع زيادة السماكة من 8cm إلى 10cm بنسبة ١٥,٦% على الرغم من بقاء نصف القطر نفسه. يبين الشكل (١٥) العلاقة بين دور المنشأة والنسبة R/T للعينات المدروسة.



الشكل (١٥) العلاقة بين دور المنشأة والنسبة R/T للعينات المدروسة

نلاحظ من خلال الشكل (١٥) أن دور المنشأة يزداد بزيادة النسبة $\frac{R}{T}$ وذلك من أجل السماكة نفسها وكانت هذه الزيادة بنسبة ٢٢,٥% عند الانتقال من النسبة ٨٠ إلى النسبة ٩٠ والسماكة 8cm في حين انخفضت هذه الزيادة إلى ١٨,٥% من أجل السماكة 10cm ومن أجل نفس النسبة، وكانت الزيادة ١٢,١% من أجل سماكة 12cm.

وعند زيادة النسبة من ٩٠ إلى ١٠٠ كانت زيادة دور المنشأة بنسبة ١٠,٦% من أجل السماكة 8cm، كانت ٩% من أجل السماكة 10cm، و ١٠,٨% من أجل السماكة 12cm.

في حين أن العينة الثالثة والرابعة لهما نفس نصف القطر 8m لكن تختلفان بالسماكة (8cm, 10cm) على التوالي نلاحظ أن الدور لهما هو (0.542, 0.539) sec على التوالي. وبالتالي دور المنشأة نقص مع زيادة السماكة من 8cm إلى 10cm بنسبة ٠,٥٦% على الرغم من بقاء نصف القطر نفسه. وهي متوافقة مع دراسة (Mohammed et al, 2008).

من خلال الأشكال (١٥, ١٤, ١٣) يمكننا القول إن الزيادة كانت ملحوظة مع ازدياد النسبة R/T وذلك من أجل كل من قوة القص والانتقال الأعظمي والدور يمكننا تفسير هذه الزيادة من خلال زيادة السطح الأفقي مع ازدياد هذه النسبة وبقاء السماكة نفسها لكن من يمكننا أن نلاحظ أنه من أجل النسبة R/T=90 فإن قيم الزيادة

في قوة القص والانتقال وكذلك الدور تكون أقل من البقية حيث نلاحظ حتى من الأشكال أن توزع القوى الحلقية وكذلك القوى الطولية تكون موزعة بشكل أكبر من بقية النسبة يمكننا القول أن هذه النسبة أكثر فاعلية من النسبتين التاليتين.

٧- النتائج:

من خلال الدراسة التي قمنا بإجرائها تم التوصل للنتائج التالية:

- ١- النمط المسيطر في القشريات هو النمط الانسحابي وكان النمط الأول (الرئيسي) هو المسيطر ومساهمته كانت كبيرة حيث تجاوز ٩٠% من أجل معظم العينات.
- ٢- القيم الأكبر للانتقال والقوى الداخلية الطولية والحلقية كانت في نقاط اتصال القشرية مع الجائز الحلقي، وخاصة بين الأعمدة حيث في نقطة وسط الجائز الحلقي بين العمودين كانت نقطة الانتقال الأعظمي الحاصل.
- ٣- القيم الكبرى للقوى الداخلية الطولية في نقاط اتصال القشرية مع الجائز الحلقي خاصة في أماكن الأعمدة.
- ٤- تزداد القوى الداخلية الحلقية مع ازدياد النسبة $\frac{R}{T}$ من أجل السماكة نفسها مع بقاء انتشار هذه القوى بشكل متشابه لجميع النماذج.
- ٥- تزداد القوى الداخلية الطولية مع ازدياد النسبة $\frac{R}{T}$ من أجل السماكة نفسها، مع بقاء انتشار هذه القوى بشكل متشابه لجميع النماذج.
- ٦- تعد النسب $R/T=90$ تبعاً لهذه الدراسة نسبة متوازنة حيث إن نسبة الزيادة في القوى والانتقالات فيها أقل من تلك الزيادة عند النسبة ١٠٠، وهي تغطي مساحة أكبر من تلك المغطاة من أجل النسبة ٨٠، وإن توزع القوى الداخلية الموافق لها هو بشكل أكبر من النسبتين الباقيتين.

٨- التوصيات:

- ٧- دراسة تأثير أنواع المواد المستخدمة في بناء القشريات على سلوكها تحت الأحمال الزلزالية، بما في ذلك استخدام مواد جديدة أو مركبات لتحسين الأداء.
- ٨- التركيز على تحسين تصميم القشريات من خلال دراسة النسب المثلى بين نصف القطر والسماكة، مما يعزز من كفاءتها في مواجهة الزلازل.

٩- المراجع :

- [1] Z. S. Makowski, "A History of the Development of Domes and a Review of Recent Achievements Worldwide," in *Analysis, Design and Construction of Braced Domes*, Z. S. Makowski, Ed. London: Granada, 1984.
- [2] W. Soedel, *Vibration of Shells and Plates*, 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [3] M. Hejazi, "Seismic Vulnerability of Iranian Historical Domes," in *Advances in Earthquake Engineering, Earthquake Resistant Engineering Structures IV*, G. Latini and C. A. Brebbia, Eds. Southampton: WIT Press, 2003, pp. 157–165.
- [4] A. W. Leissa, *Vibration of Shells*. New York: The Acoustical Society of America, 1993.

- [5] D. Chakravorty and J. N. Bandyopadhyay, "On the Free Vibration of Shallow Shells," **J. Sound Vib.**, vol. 185, no. 4, pp. 673–684, 1995.
- [6] D. Y. Tan, "Free Vibration Analysis of Shells of Revolution," **J. Sound Vib.**, vol. 213, no. 1, pp. 15–33, 1998.
- [7] Z. L. Zhang and C. J. Cheng, "Natural Frequencies and Mode Shapes for Axisymmetric Vibrations of Shells in Turning-Point Range," **Int. J. Solids Struct.**, vol. 43, no. 18–19, pp. 5525–5540, 2006.
- [8] W. Soedel, **Vibration of Shells and Plates**, 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [9] N. Grillanda, A. Chiozzi, G. Milani, and A. Tralli, "Collapse Behavior of Masonry Domes Under Seismic Loads: An Adaptive NURBS Kinematic Limit Analysis Approach," **Eng. Struct.**, vol. 200, p. 109517, Dec. 2019.
- [10] A. F. Dakheel and I. S. Saleh, "Seismic Behavior of Schwedler Domes," **Int. J. Mech. Eng.**, vol. 8, no. 1, Jan. 2023.
- [11] A. Bayraktar and E. Hokeleki, "Seismic Failure Behaviour of Masonry Domes Under Strong Ground Motions," **Research Square**, Feb. 2022.
- [12] A. Mehrotra and B. Glisic, "Deconstructing the Dome: A Structural Analysis of the Taj Mahal," **J. Int. Assoc. Shell Spat. Struct.**, vol. 56, no. 4, pp. 269–284, 2015.
- [13] E. Hamed, M. Bradford, R. Gilbert, and Z. Chang, "Analytical Model and Experimental Study of Failure Behavior of Thin-Walled Shallow Concrete Domes," **J. Struct. Eng. ASCE**, 2011.
- [14] M. S. Zarghamee et al., "Buckling of Shallow Spherical Concrete Domes Under Gravity and Earthquake Loads," **J. Struct. Eng.**, vol. 146, no. 5, p. 04020053, 2020.
- [15] Mohammed et al., "Dynamic Characteristics of Large Reinforced Concrete Domes," in **Proc. 14th World Conf. Earthquake Eng.**, Beijing, China, Oct. 2008.
- [16] A. M. Hammood and D. A. M. Jawad, "Seismic Evaluation of Cylindrical Concrete Shells," **Open Eng.**, vol. 13, no. 1, 2023.
- [17] D. A. M. Makhloof, A. R. Ibrahim, X. Wei, and X. Ren, "Damage Performance and Failure Analysis of Reinforced Concrete Doubly Curved Shells Under Seismic Excitations Considering Curvature and Thickness Variation," **Adv. Struct. Eng.**, vol. 26, no. 15, 2023.
- [18] R. Pathak and R. K. Khare, "Linear Static and Dynamic Analyses of Reinforced Concrete Spherical Dome Structure Under Seismic Loads," **Lect. Notes Civ. Eng.**, vol. 55, 2020.