

دراسة تأثير قطر فتحة التفريغ في الصوامع الدائرية على شكل الجريان وعلى الضغط الناجم على جدران الصومعة

د. م. هالة حمادة*

المُلخَص

تُعرضُ في هذا البحث الدراسة التجريبية عن تأثير أبعاد فتحة التفريغ في شكل جريان المواد الحبيبية داخل الصومعة، وكذلك في الضغط الأفقي الناتج على جدار هذه الصومعة، إذ أُجريت التجارب على صومعة اسطوانية معدنية ذات قاعدة أفقية، واستعملت الذرة العلفية بوصفها مادةً حبيبية، و رُوِّقَبَ الجريان بأخذ منصف من البلّكس غلاس يمر من مركز الصومعة ويقسمها إلى نصفين، في حين أن الضغط قيسَ لصومعة كاملة وعلى عدة نقاط على كامل ارتفاع الصومعة، وقد أظهرت القياسات أن الضغط الأفقي المطبق على جدار الصومعة لا يتأثر تأثراً كبيراً نتيجة تغيير أبعاد فتحة التفريغ .

الكلمات المفتاحية: الصوامع_فتحة التفريغ_الجريان النواتي_ضغط الجريان

* مدرس - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

1- المقدمة:

تعدّ الصوامع من المنشآت المهمة في البلدان الزراعية والصناعية، وتأتي أهمية الصوامع بوصفها الأسلوب الأنسب والأكثر استخداماً لتخزين الحبوب وغيرها من المواد. وقد كانت الصوامع تصمم سابقاً اعتماداً على الضغط الستاتيكي ولم يكن الضغط الديناميكي الناتج عن تعبئة وتفريغ الصوامع مأخوذاً بالحسبان، ولكن وجد فيما بعد أن الضغط الديناميكي المؤثر في جدران الصومعة والناتج عن جريان المواد الحبيبية في أثناء عملية التفريغ خاصة أكبر بكثير من الضغط الستاتيكي المؤثر في هذه الجدران، وقد أدى هذا الضغط الديناميكي - في كثير من الأحيان - إلى حدوث تشققات مهمة، أو حتى إلى انهيار الصومعة بكاملها [6].

لذلك كان لا بدّ من دراسة توزيع الضغط الديناميكي الناتج على جدران الصومعة لأخذه بالحسبان في أثناء الحساب والتصميم الإنشائي للصوامع، ولما كان توزيع الضغط الديناميكي على جدران الصومعة له علاقة بالعديد من العوامل فقد دأب الباحثون في دراسة هذه العوامل التي من أهمها الأبعاد الهندسية للصومعة وشكل مخروط التفريغ؛ ولذلك ظهرت العديد من البحوث في هذا الموضوع، فمنها من اهتم بدراسة الضغط الشاقولي المطبق فقط على قاعدة الصومعة [7] وذلك مع تغيير في أبعاد فتحة التفريغ، فأظهرت هذه الدراسة أنّ هناك انخفاضاً مهماً للضغط في المناطق المجاورة لفتحة التفريغ في حين أن سرعة تدفق المواد بقيت ثابتة؛ مما يعني أن سرعة التدفق للمواد لا تتعلق بالضغط الذي ينشأ في منطقة التفريغ. فيما اهتمت بحوث أخرى [8] [9] بدراسة أثر تغيير فتحة التفريغ في سرعة تدفق المواد دون الاهتمام بالضغط الناجم، فبيّنت الأخيرة أن زيادة عرض فتحة التفريغ يساعد على زيادة معدل سرعة تدفق

المواد. وفي دراسة سابقة للباحث [4] دُرِسَت المتغيرات جميعها المتعلقة بالأبعاد الهندسية، وكذلك زاوية قمع التفريغ التي بيّنت أن الضغط الأفقي المطبق على جدار الصومعة يتأثر تأثيراً كبيراً ومهماً بالأبعاد الهندسية للصومعة ولاسيما زاوية قمع التفريغ التي كان لها التأثير الأكبر، ولكن لم يتم التطرق لتأثير أبعاد فتحة التفريغ، في حين بيّنت دراسة أخرى [2] أن توزيع السرعة للمواد المتدفقة لا يكون متساوياً على طول قطر فتحة التفريغ دون التطرق إلى الضغط الذي يمكن أن ينشأ على جدران الصومعة أو عند فتحة التفريغ.

2- هدف البحث:

استناداً إلى ما سبق فإنّ من المفيد معرفة تأثير تغيير أبعاد فتحة التفريغ في الضغط الديناميكي المؤثر في جدران الصومعة، ونظراً إلى أنّ الضغط الديناميكي يرتبط ارتباطاً وثيقاً بطبيعة جريان المواد فإنّ من الضروري أيضاً دراسة شكل جريان المواد الحاصل داخل الصومعة نتيجة للتغيير في أبعاد فتحة التفريغ . لتحقيق هذا الهدف أُجريت هذه التجارب على نموذج صومعة بمقياس 1/10 لصومعة اسطوانية حقيقية بقطر (8m) وارتفاع (15m).

3- النمذجة:

إن إجراء التجارب على صوامع حقيقية بمقياسها الأصلي قد تكون عملية مكلفة جداً من جهة، وصعبة أيضاً من جهة أخرى حيث تكون هناك صعوبة كبيرة من الناحية العملية في إجراء أي تغييرات في مواصفات الصومعة، فضلاً عن ذلك ففي الصوامع الحقيقية التي تكون جدرانها منفذة من الخرسانة أو من المعدن يكون من المتعذر مراقبة شكل الجريان الحاصل بداخلها، ومن ثمّ من أجل هذه الأسباب أُجريت التجارب والقياسات على نماذج مصغرة بحيث يمكن تغيير مواصفاتها بسهولة ونتمكن

3-1 نمذجة الجريان:

اختيرت الذرة العلفية بوصفها مادة حبيبية، وباعتبار أنه اختير المعدن لصنع النموذج فإن هذا سيسبب خللاً بشرط من شروط التشابه وهو الاختلاف بين زاوية احتكاك المادة على البيتون وزاوية احتكاك المادة على المعدن الذي يعدُّ أنعم، ولكن تبعاً لبحوث سابقة [12] وجد أنه من الضروري استخدام جدران أنعم في النموذج من تلك التي تستخدم في الأصل؛ لأنه كلما زادت زاوية الاحتكاك أدى ذلك إلى عرقلة وممانعة للجريان الحاصل الأمر الذي يؤدي إلى تشويه شكل الجريان الحاصل عن الأصل. وعليه يفضل استخدام مادة للجدران أنعم بقليل عن الأصل بحيث لا تكون زاوية الاحتكاك مختلفة بشكل كبير عن الواقع حتى لا يؤدي ذلك إلى تشويه شكل الجريان، ومن ثمَّ يؤثر في الضغط الناجم عن هذا الجريان، وعلى أي حال فإن الاختلاف بين زاوية احتكاك المادة على السطح للأصل وزاوية احتكاك المادة على جدار النموذج لا يزيد على 2^0 درجة وهذا الاختلاف يعدُّ مقبولاً اعتماداً على تلك الدراسات. أمَّا فيما يتعلق بالمادة الحبيبية المستخدمة فقد عدَّ العديد من الباحثين أنه من الضروري استعمال المادة الحبيبية نفسها في النموذج والأصل بحيث تكون زاوية الاحتكاك الداخلي متماثلة في الأصل والنموذج $\phi_m = \phi_p$ ولذلك استُعملت الذرة العلفية، وبحيث تكون حباتها أصغر بقليل من الذرة المستخدمة في الصوامع الحقيقية وهذا الإجراء اتُّبع في العديد من البحوث [12] [13] [14]، ولكن في الوقت نفسه يجب ألا تكون الحبات صغيرة جداً حتى لا يحدث لدينا حالات من التكتل للمواد. كما أخذ بالحسبان تناسب أبعاد حبات المادة المستخدمة مع أبعاد فتحة التفريغ؛ وذلك حتى لا تتشكل أفواس من المادة المخزنة عند فتحة التفريغ مما يؤدي

من إجراء العديد من التجارب بشكل غير مكلف، كما يمكن مراقبة شكل الجريان وتصويره من خلال الجدران التي نفذت من البلكس غلاس.

ولذلك صُمِّمَ نموذج لصومعة اسطوانية واختيرت أبعاد النموذج انطلاقاً من نظرية باكينغهام للتشابه، فحسب نظرية التحليل البعدي استُنتج أنه ينبغي أن يكون النموذج مشابهاً للأصل من الناحية الهندسية، ويتحقق التشابه الهندسي عندما تكون النسبة بين جميع الأبعاد الهندسية المتقابلة في الأصل والنموذج واحدة، في حين أنه يجب أن تكون لجميع الزوايا المتقابلة في الأصل والنموذج القيمة ذاتها. وبناءً على ذلك اختيرت أبعاد للنموذج كالآتي ارتفاع الصومعة، $H=150\text{cm}$ ، قطر الصومعة $D=80\text{cm}$ ، وبالنسبة إلى قطر فتحة التفريغ فكانت $d=2.5\text{cm}-3.5\text{cm}-4\text{cm}-5\text{cm}$ في حين اختيرت زاوية ميلان القمع بالنسبة إلى الأفق مساوية للصفر ($\alpha = 0$) لأنَّ النموذج يمثل صومعة حقيقية بقاعدة أفقية، الشكل (1) يبين النموذج المدروس.



الشكل (1) نموذج الصومعة

وقد استُخدم لوح من البلكس غلاس بشكل منصف للصومعة لمراقبة جريان المواد داخل الصومعة (كما يظهر في الشكل (3))، وهذا الجدار المنصف للصومعة لن يكون له تأثير في تشويه شكل الجريان الحاصل لأن الجريان في الصوامع الاسطوانية يكون متناظراً في المقطع العرضي للصوامع الدائرية ومركزياً، أي قناة جريان مركزية محاطة باسطوانة من المواد الثابتة، ومن ثمَّ لم يكن لهذا الجدار أي تأثير في شكل الجريان، وقد اتُّبع هذا الإجراء لمراقبة الجريان في العديد من البحوث [10].



الشكل (3) نموذج الصومعة مع الجدار المنصف-ووعاء التفريغ والتعبئة

إلى توقف انسياب المواد، إذ ينبغي بحسب البحوث [12] [13] أن لا يتجاوز أكبر بعد للحبيبة ثلث أو ربع قطر فتحة التفريغ، فكانت الذرة المستخدمة ذات أبعاد حبيبية تراوح بين (3-4 ملم) ووزن حجمي $\gamma = 0.8 \text{ g/cm}^2$ وهذا الشرط محقق باستخدام أقطار لفتحة التفريغ كالاتي: $d=2.5\text{cm}-3.5\text{cm}-4\text{cm}-5\text{cm}$.

4-منصة التجارب:

تتألف منصة التجارب من نموذج الصومعة الاسطوانية، قاعدة لتثبيت الصومعة، ووعاء تفريغ وتعبئة، إذ يستخدم هذا الوعاء لاستقبال المواد الحبيبية المفرغة، كما يستخدم وبواسطة رافعة لتعبئة المواد الحبيبية في نموذج الصومعة. أجهزة قياس الضغط الأفقي (الشكل(2))، تثبتت على كامل ارتفاع جدار الصومعة التي بدورها وُصِلت إلى جهاز حاسوب إذ يستقبل قيم الضغط إلى الحاسب ويعرضها بشكل خطوط بيانية بواسطة برنامج مخصص لهذه الأجهزة. وتُغيَّر أبعاد فتحة التفريغ بسحب قاعدة النموذج للحصول على الفتحة المطلوبة .



الشكل (2) أجهزة قياس الضغط

5- التجارب:**5-1 مراقبة شكل الجريان:**

بهدف دراسة تأثير تغير قطر فتحة التفريغ في شكل الجريان، أُخِذَتْ أربع قيم لقطر فتحة التفريغ هي كالتالي: (d= 2.5- 3.5- 4- 5 cm)، كما رُسمت شبكة كثيفة من الخطوط على لوح البلكس المنصف؛ وذلك من أجل تحديد مناطق الجريان بشكل دقيق، وقد رُصِفَتْ طبقات من الذرة مع طبقات صغيرة من لون آخر وهو العدس الذي يتقارب مع الذرة من حيث أبعاد الحبة، ونتيجة التمايز بين ألوان الطبقات تم الحصول على شكل واضح جداً لشكل الجريان على الرغم من صعوبة تنفيذ هذا الرصف للطبقات، ولتوثيق شكل الجريان صُوِّرَ وذلك بأخذ صورة فوتوغرافية كل 10 ثوانٍ منذ بدء التفريغ وحتى انتهاء التفريغ الكامل للصومعة. وتبيّن الأشكال (4-5-6-7) شكل الجريان الناتج من أجل فتحات تفريغ مختلفة الأقطار.

و بدراسة أشكال الجريان للحالات الأربع يمكن ملاحظة أن الجريان لم يغير من نموده الذي هو الجريان النواتي إذ يظهر واضحاً أن الجريان يحدث في قناة مركزية ضمن مناطق ساكنة من المواد الحبيبية متوضعة قرب الجدران، كما لوحظ أن عرض قناة الجريان لم يحدث فيه أي تغير مهم في الحالات الأربع، فضلاً عن ذلك فإن عرض المناطق الثابتة والمتاخمة للجدران كانت متماثلة تقريباً في حالات تغيير قطر فتحة التفريغ جميعها سواءً في القسم العلوي من الصومعة أو حتى في المناطق القريبة من فتحة التفريغ، ولكن يمكن القول إنَّ التغير الوحيد الواضح كان هو الاختلاف في زمن تفريغ الصومعة، فمثلاً كان زمن تفريغ الصومعة ذات الفتحة (d= 2.5cm) أكبر من الزمن الذي استغرقه تفريغ الصومعة ذات الفتحة (d= 5 cm) أي إنَّ سرعة التفريغ

في الصومعة ذات الفتحة الكبرى أكبر من سرعة تفريغ في الصومعة ذات الفتحة الصغرى، دون أن يؤثر ذلك في شكل الجريان ولكن هل يؤثر ذلك في الضغط؟ لذلك كان التوجه نحو قياس الضغط الأفقي الناتج على جدران الصومعة لمعرفة ذلك.

5-2 قياس الضغط الأفقي:

من أجل قياس الضغط الديناميكي للحالات المختلفة لعرض فتحة التفريغ استُخدمت الأجهزة المخصصة لقياس الضغط في الصوامع وثُبِتَتْ على مستويات مختلفة على كامل ارتفاع نموذج الصومعة، إذ اختيرت أماكن توضع الأجهزة اعتماداً على دراسات سابقة وتجارب تمهيدية، وقد كُتِفَتْ في المناطق التي يتوقع فيها حدوث تغيرات كبيرة وقيم عظمى للضغط الديناميكي [5] يظهر الشكل (8) المستويات التي ثُبِتَتْ الأجهزة فيها .



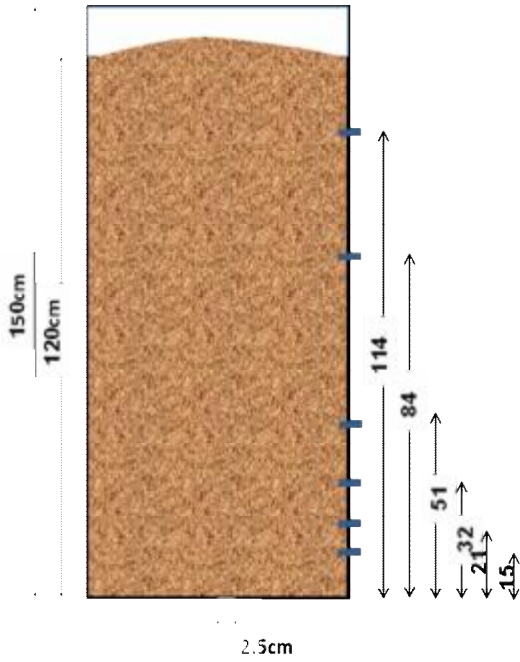
الشكل (4) شكل الجريان باستخدام فتحة تفريغ 2,5cm



الشكل (7) شكل الجريان باستخدام فتحة تفريغ 5 cm



الشكل (5) شكل الجريان باستخدام فتحة تفريغ 3.5 cm



الشكل (8) مستويات توضع الأجهزة



الشكل (6) شكل الجريان باستخدام فتحة تفريغ 4 cm

عنه تغيير مهم في الضغط الأفقي الناتج. وبدراسة تغيرات الضغط على كامل ارتفاع الصومعة يمكن ملاحظة الشيء نفسه وهو أنه لم تنتج تغيرات كبيرة في الضغط مع تغيير فتحة التفريغ، إذ يبين الشكل (14) الضغط الديناميكي الأفقي على كامل ارتفاع الصومعة وذلك من أجل النماذج الثلاثة بفتحات تفريغ مختلفة، وقد حُصِبَ الضغط الديناميكي الأفقي لهذه الصومعة وفقاً للكود الألماني للمقارنة [1]، إذ يلاحظ أن منحنيات الضغط للفتحات الثلاث متطابقة بشكل كبير في ثلثي الصومعة العلويين، أما الاختلاف البسيط الناتج في الثلث السفلي من الصومعة فهو ناتج عن وجود المقطع الفعال عند هذه النقطة، وهو المقطع الذي تظهر عنده غالباً ضغوط ديناميكية عشوائية قد تختلف فيما بينها للحالة الواحدة.



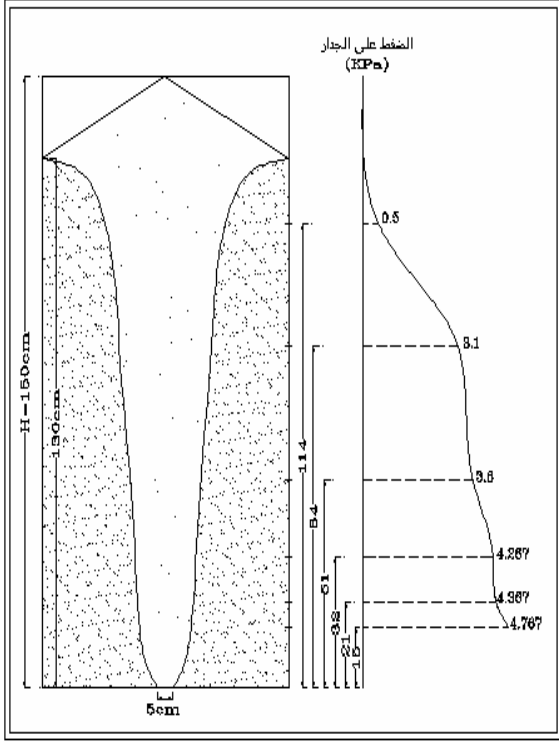
الشكل-9- منحنى بياني لقيم الضغط الديناميكي المسجلة

إذ كان يُثبتُ الجهاز في كل مستوى ثم تعبأ الصومعة وبعدها تبدأ عملية التفريغ ويجري قياس الضغط، ويعاد هذا الإجراء ثلاث مرات وأحياناً ست مرات، ثم ينقل الجهاز إلى مستوى آخر ويجري القياس بالطريقة نفسها، إذ أُجريت 54 تجربة قياس ضغط، وقد سُجِّلتِ القياسات جميعها على برنامج خاص بالأجهزة المستخدمة بشكل خطوط بيانية (الشكل9)، ويظهر المخطط البياني لقياس الضغط على شاشة الحاسوب في أثناء عملية التفريغ، إذ يمثل المحور الأفقي الزمن في أثناء القياس في حين يمثل المحور الشاقولي قيم الضغط المقاسة، وقد اعتمدت القيمة العظمى للضغط الديناميكي المسجل من كل خط بياني.

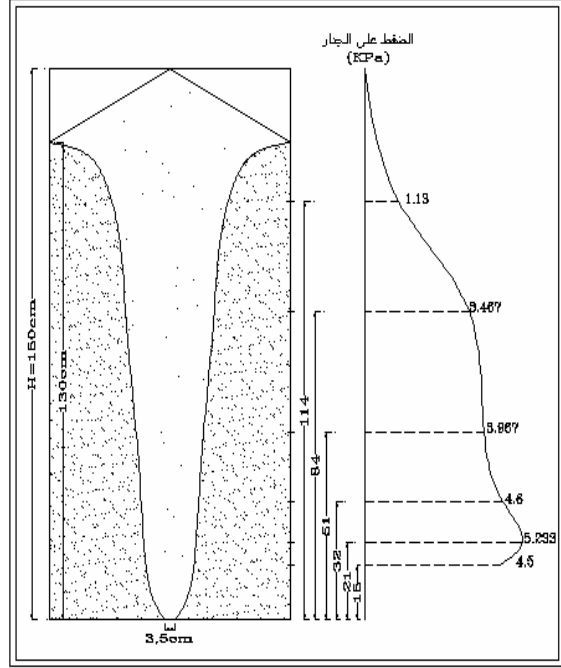
أجريت القياسات على نماذج الصوامع ذات فتحات تفريغ بقطر (3.5سم - 4سم - 5سم) وقد بيّنت القياسات ظهور القيم العظمى للضغط الديناميكي عند بدء التفريغ وهذا ما يتوافق مع البحوث والدراسات السابقة [3] [11]

أما فيما يتعلق بقيم الضغط الديناميكي المقاسة على كامل ارتفاع الصومعة فقد ظهرت قيم كبيرة للضغط في الثلث السفلي للصومعة عند المقطع الفعال [5]، وهو المكان الذي يغير فيه الجريان اتجاهه من القسم الاسطواني باتجاه فتحة التفريغ، وهذا ما يظهر واضحاً في الأشكال (10-11-12) للحالات الثلاث لفتحات التفريغ.

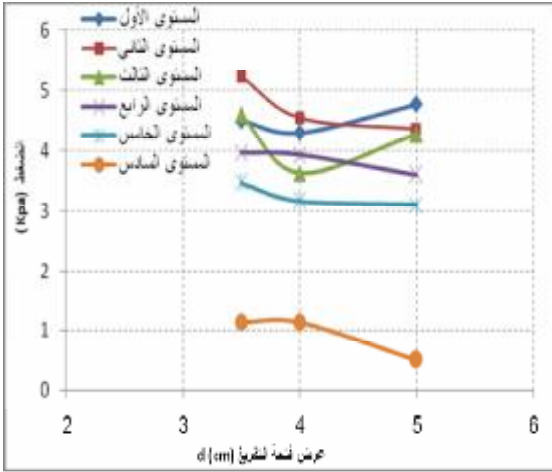
وبدراسة تغيرات الضغط تبعاً لتغيير فتحة التفريغ عند المستويات الستة التي قيسَ الضغط عندها لوحظ أن التغيير كان طفيفاً كما هو موضح في الشكل(13)، إذ يلاحظ أنه عند المستوي السادس والخامس والرابع أن الخط البياني شبه مستقيم أي إنَّ الضغط ثابت مع التغيير في أبعاد فتحة التفريغ، في حين أنه في المستويات الثالث والثاني والأول هناك تغيير طفيف في الضغط مع تغيير أبعاد فتحة التفريغ، أي إنَّ تغيير فتحة التفريغ لم ينتج



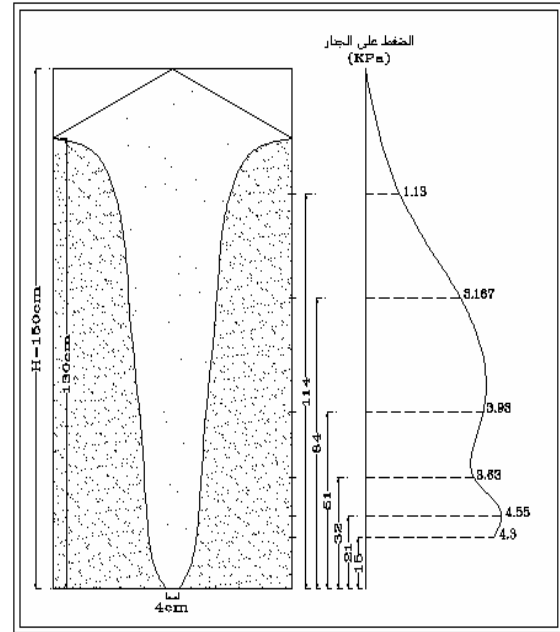
الشكل (12) الضغط الديناميكي مقيساً باستخدام فتحة تفريغ 5 cm



الشكل (10) الضغط الديناميكي مقيساً باستخدام فتحة تفريغ 3.5 cm

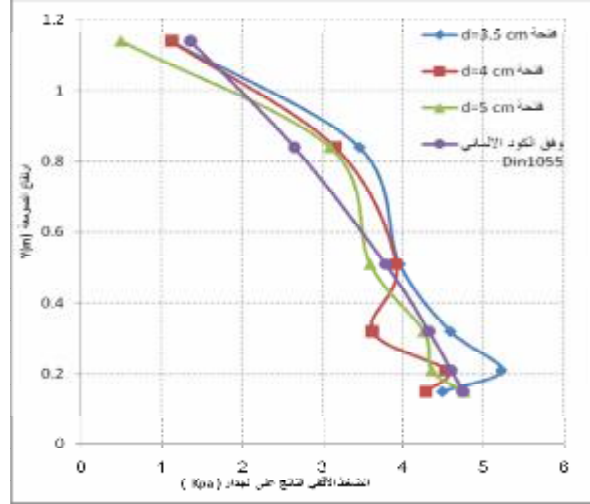


الشكل (13) علاقة الضغط الأفقي الناتج على الجدار مع عرض فتحة التفريغ عند المستويات الستة على كامل ارتفاع الصومعة



الشكل (11) الضغط الديناميكي مقيساً باستخدام فتحة تفريغ 4 cm

حدوث تغيرات كبيرة في الضغوط الديناميكية الناتجة على جدران الصوامع.



الشكل (14) علاقة الضغط الأفقي الناتج على الجدار مع تغير عرض فتحة التفريغ

6- النتائج:

- إن التغيير في أبعاد فتحة التفريغ لا يؤدي إلى تغيير في شكل الجريان، إذ تحافظ قناة الجريان على عرضها وكذلك المناطق الثابتة .
 - لا تظهر تغييرات مهمة في الضغط الديناميكي الأفقي الناتج على جدران الصومعة نتيجة تغيير في أبعاد فتحة التفريغ، وهذا عكس ما كان متوقعاً.
 - هناك ارتباط وثيق بين شكل الجريان والضغط الناتج إذ إنَّ عدم حدوث تغيير في شكل الجريان رافقه عدم حدوث تغيير مهم في الضغط الناتج، وهذا ما يحاول العديد من الباحثين دراسته وتأكيدده.
 - يسهم تغيير أبعاد فتحة التفريغ في تغيير زمن تفريغ الصومعة أي بكمية المواد الخارجة من الصومعة، وبتعبير آخر يؤدي إلى تغيير في غزارة المواد المتدفقة من الصومعة.
- ومن ثمَّ نتوصل إلى نتيجة تتلخص في إمكانية تغيير أبعاد فتحة التفريغ للحصول على الغزارة التي تتناسب واستيعاب السيور والشاحنات الناقلة دون القلق من

- 7-المراجع :**
12. Carson J.W, Royal TA “Modeling the Flow of bulk solids” powder handling and processing ,Volume3,Number3,1991, 4pp
 13. Johanson J.R.; “Modeling Flow of Bulk Solids” powder technol.,5(1971/72), p. 93-99
 14. J.F.Chen ,J.y.Ooi, J.M.Rotter ,M.Batikha ,Z.Zhong ,B.Andreasson ,S.E. Forsmo , K.Tano , G.Horrigmoe “Finite element analysis of solid stresses in a silo with an inner tube” Institute for Infrastructure & Environment, School of Engineering, the King’s Buildings, University of Edinburgh, Edinburg EH9 3JL,U.K.
 1. DIN 1055, " Design Loads for buildings/ Loads in silo bins" German standards (DIN Normen), 2000, 6pp.
 2. Istvan, Oldal, Dr. Bela, M.Csizmadia," Determination of velocity distribution at silo outlet", international multidisciplinary conference, Baia Mare, Romania, May 17-18, 2007.
 3. J. Hartl, J. Y. Ooi, J. M. Rotter, M. Wojcik, S. Ding, G. G. Enstad, " The influence of a cone – in – cone insert on flow pattern and wall pressure in a full scale silo". Chemical engineering research and design, 36 (2008), 370-378.
 4. Ph.D. Hala Hammadeh, " The effect of silo geometry on the shape of funnel flow and wall pressure of granular material", 1995, 137 pp.
 5. J. W. Carson, Ph.D, R. T. Jenkyn, P.Eng. " Load development and structural considerations in silo desing". Reliable flow of particulate solids II, Oslo, Norway, August 1993.
 6. F. Ayugo, P. Aguado, E.Gallego, and A. Ramirez, " New steps towards the knowledge of silos behaviour". International Agrophysics, Spain, 2005.
 7. M.A.Aguirre,P.A.Gago ,L.A.Pugnaloni,D.Letourneau,andJ-christoph Geminard “ Evolution of Pressure Profiles During the Discharge f a Silo” Published 8 February 2012 PHYSICAL REVIEW E85,021303(2012)
 8. M.A.Aguirre,J.G.Grande,A.Calvo,L.A.Pugualoni and J.c.Geminard “ Pressure independence of granular flow through an aperture” Author manuscript ,published in “Physical Review Letters (2012) LL 12125”
 9. Shie-Chen Yang, Shu-San Hsiau “The simulation and experimental study of granular material discharge from a silo”
 10. Jintao wu, Jiang Binbo, Jizhong chen ,Yonygrong yong (2008) “Multi-scale study of particle flow in silos” Journal of advanced powder Technology 20(2009) pp. 62-73.
 11. H.Schlick, F.Gehbauer, A.Auchter and J.Gallinat “Relationships Between Flow Properties and the Process of Loading in Silos With Central cones and Plough Feeder Discharge” bulk solids handling , volume 16 .Number 1. January/March 1996.pp 83-89