دراسة تأثير نسبة التحميل على الخسائر الثانوية والتبادل الحراري للجريان ثنائي الطور (غاز –صلب) في أنبوب متغير المقطع

زيد معن الدليمي

الكلية التقنية / النجف

هيئة التعليم التقني

الخلاصة

هذا البحث يركز على دراسة تأثير نسبة التحميل وحجم الجسيمات الصلبة على سرعة و درجة حرارة كلٍ من الغاز والصلب وضغط الخليط لجريان ثنائي الطور غاز – صلب خلال أنبوب فنتوري وذلك بحل المعادلات الحاكمة عدديا بطريقة المتغيرات المحافظة (**conservative variables**).

تم اختيار أنبوب فنتوري بنسبة خنق ٥٠% ونسبة نشر هي ٢٠٠% والطول متساوي لكل من البوق ، العنق والناشر لدراسة التغيرات التي تطرأ على الهواء المحمل بالمادة الصلبة وهي (الضغط ودرجة الحرارة للصلب والغاز وسرعتيهما). تم اختيار نسب تحميل ٠.٥، ٢، ٤ وقطر جسيمات **١٠٠µm** ومعدل تدفق غاز **(0.6kg/s)** كمدخلات لحساب توزيع الضغط والسرعة ودرجة الحرارة لكلٍ من الهواء والمادة الصلبة.

استخدمت مجموعتين من الأقطار للجسيمات الصلبة (٥٠، ٢٠٠مايكرون) وأجريت الحسابات عليها عند نسبة تحميل (٤). أهم الاستنتاجات التي تم الحصول عليها هي أن الزيادة بخسارة الضغط ناتجة أما من زيادة نسبة التحميل، وخاصة في منطقة التقارب لأنبوب فنتوري والذي يتراوح بين (٠.٧ – ١.٣) اكبر من نقصان الضغط في منطقة التباعد للأنبوب، أو من نقصان في حجم جزيئات المادة الصلبة والتي تتراوح بين (٠.٧ – ١.١) لمدى من حجم الجزيئات من (٥٠–٢٠٠مايكرون)، حيث ان زيادة الخسارة بالضغط الناتج من نقصان الجسيمات الصلبة هو اكبر من خسارة الضغط من زيادة نسبة التحميل. ومن الجدير بالذكر أن سرعة المادة الصلبة تتأثر بنسبة التحميل وحجم جزيئات المادة الصلبة ، ففي حالة زيادة نسبة التحميل نلاحظ هبوط في سرعة المادة الصلبة ولمديات من تغير السرعة تتراوح بين (١.١-٢.١) ويكون التغير واضحا في منطقة التباعد لأنبوب فنتوري. ونحصل على نفس التأثير في حالة نقصان حجم الصلب. ويظهر مقدار التغير في سرعة الجسيمات الصلبة من تغير حجم تلك الجسيمات بمدى يتراوح من (١.٦ – ٢.٧) ويظهر

في منطقة الخنق والناشر بشكل واضح مقارنة بمنطقة التقارب لأنبوب فنتوري وتم مقارنة النتائج مع نتـائج لبحوث سابقة ووجدنا توافق كبير في تصرف المتغيرات المدروسـ ـة.

الكلمات المرشدة: الخسائر الثانوية، الجريان في أنبوب متغير المقطع، جريان ثنائي الطور، نسبة تحميل الصلب، التميع.

STUDY THE EFFECT OF LOADING RATIO ON SECONDARY LOSS AND HEAT EXCHANGE IN TWO PHASE FLOW (GAS – SOLID)IN VARIABLE CROSS SECTIONAL PIPE.

Zaid M. Dulaimy
Technical College Najaf
F.T.E

ABSTRACT

The flow of gas with a suspension of solid particles through venture has been analyzed theoretically. Computations of the flow parameters have been performed based on one-dimensional analysis and numerical solution of the governing equations by (physico – computational model). An investigation of pressure variation, velocity and temperature distributions across venture for air only and for gas-solid suspensions were carried out for specific air mass flow rate and solid loading ratio. Venture was used to produce a non-equilibrium two-phase flow region and the effects of solid particles on the pressure distribution have been considered. The effects of different loading ratios of (0.5 ,2 ,4) on pressure drop, gas and solid velocity and temperature distributions for the same particle diameter of 100 microns and for constant gas mass flow rate of (0.6 kg/s) are determined.

Two sets of diameters of the solid particles (50, 200 microns) were used at the loading rate of (4). The most important conclusions obtained are that the increase loss of pressure due to the increased rate of loading, especially in the convergence of the Venturi, which ranges between (0.7 - 1.3) greater than the decrease of pressure in the divergence of the tube, or a decrease in the size of the particles of solid material, it range (0.7 - 1.1) for a range of particle size of (50-200 microns), where the increase in pressure loss resulting from the decrease of solid particles is greater than the loss of pressure due to increase the loading rate. Increasing the proportion of loading note a decline in the speed of the solid and the change of speed ranges between 1.1 and 2.1 and the change is evident in the spacing of the Venturi. And we get the same effect in the case of decrease in the volume of solid. And shows the amount of change in the speed of solid particles to the change of the size of the particles at a range of (1.6 to 2.7) and appears in the throat and the divergence clearly compared to the convergence of the Venturi.

قائمة الرموز

A	مساحة المقطع العرضي	m^2
C_D	معامل اعاقة الصلب	
C	الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط	kJ / kg . K
dp	قطر الجسيم الصلب	µm

$\Delta \dot{E}_p$	مصدر الطاقة نتيجةً لوجود الطور الصلب	kJ / s
f	معامل الاعاقه	
F_{wx}	قوة القص عند الجدار (معاكس لاتجاه الجريان)	N
g	التعجيل الارضي	m/s^2
h	انثالبي الغاز	kJ / kg
K	الموصلية الحرارية للغاز	W / m . K
k	الحرارة النوعية النسبية للغاز	
L	طول انبوب الفنتوري	m
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	معدل التدفق	kg / s
ΔM_p	معدل الزخم نتيجةً لوجود الطور الصلب	N
$\Delta \dot{M}_A$	معدل الزخم نتيجةً لتغير المساحة	N
Nu	رقم ناسيلت	
p	الضغط	kN / m^2
Δp_z	هبوط الضغط نتيجة الجريان	kN / m^2
Pr	رقم برانتل	
$\dot{Q}$	معدل الحرارة المنتقل إلى سطح الحجم المسيطر	kJ / s
Re	رقم رينولد	
R	ثابت الغاز	J / kg . K
T	درجة الحرارة	K
t	الزمن	s
u	سرعة الطور الغازي	m / s
Ur	السرعة النسبية بين الطورين	m / s
v	سرعة الطور الصلب	m / s
w	معدل الشغل	kJ / s
z	نسبة التحميل	

الرموز اليونانية

Δ	مقدار التغير	
ρ	الكثافة	kg / m^3
μ	لزوجة الغاز الكاينيتيكية	$N . s / m^2$
τ	خاصية الزمن الحرارية للصلب	s
β	معامل خاص بحجم الصلب	
ϵ	معامل الشكل	
θ	زاوية ميل مجرى الجريان	deg

الرموز السفلى

0	نقطة الدخول لكل منطقة من انبوب الفنتوري
1	بداية الحجم المسيطر
2	نهاية الحجم المسيطر
g	الغاز
in	مدخل مقياس فنتوري
out	مخرج مقياس فنتوري
p	الصلب
th	منطقة العنق (الخنق)
z	خليط من غاز و صلب

المقدمة

أن قابلية التنبؤ بخواص الجريان لغاز يحمل دقائق من مادة صلبة مهمة في تطوير العمليـات والأجهزة الصناعية وذلك لان العديد من التطبيقات العملية تضم جريان أحادي البعد أو شبه أحادي ، مثلا الجريان خلال مجرى أو أنبوب فنتوري (**Sharma,1978**) ومن هذه التطبيقات العملية أنظمة النقل الهوائية (pneumatic conveying system) ومطاحن و محارق الفحم و كذلك في نواتج احتراق الصواريخ حيث توجد دقائق غير محترقة (**Lee, 1982**) وان هذا الجريان يختلف عن الجريان الأحادي الطور (single – phase flow) بكثير من النقاط ، واهم نقاط الاختلاف بين الطورين هي **أن** الجريان المتعدد الأطوار(multiphase flow) يميز عن طريق الكميات النسبية وتوزيع الأطوار وفيه لا يتماثل نموذج الجريان حول محور الجريان ولكلا الجريانين الأفقي والعمودي وذلك لاختلاف كثافة الأطوار،

ويزيد معدل انتقال الحرارة والكتلة بين الأطوار من تعقيد الجريان المتعدد لأنه يؤخر الجريان من الوصول إلى حالة الاستقرار (**Govier,1972**).

من أهم العلاقات المعتمدة للجريان متعدد الأطوار مقدمة من قبل G.w. Govier & K. Aziz (**Govier, 1972**) لان معظم العلاقات هي صعبة الاستعمال أما بسبب احتوائها على عناصر من الصعب حسابها مثل تكور الجسيم الصلب أو معامل الشكل shape factorأو أنها تطبق لحالات خاصة يصعب تعميمها. القليل من الباحثين بينوا مدى دقة بحوثهم و مدى محدودية الحدود التي تطبق بها بحوثهم مما يخلق مشكله عند المصممين في اختيار أي العلاقات التي تناسب عملهم (التطبيق) فهم لا يعلمون مدى المتغيرات التي تعمل عندها هذه العلاقات مثل نسبة التحميـــل حجم الصلب أو حجم الأنبوب .

إن الهدف من البحث الحالي هو دراسة نظرية لتأثير نسبة التحميل وقطر الجسيمات الصلبة على جريان ثنائي الطور غاز– صلب خلال أنبوب فنتوري .

قدم الباحث (**Efstathios, 1984**) تحليل تقريبي لجريان غاز- صلب مبني على الطراز الاضطرابي لجريان خليط متغير الكثافة في مجرى حيث أن معادلات إجهاد رينولد تدمج التغير بالسرعة والكثافة معا وتتعامل مع نموذج الجريان ومتوسط الكميات المهمة مثـل فيض الكتلة ومعامل الاحتكاك ومعدل الكثافة ومعدل المساحات المحجوزة من قبل الطور، حيث تركزت فكرة العمل على إقامة دراسة على جريان معزول حرارياً في أنبوب وافترض ان التغير باتجاه واحد و مستقر ، كل هذه الشروط قد طبقت على معادلة (Navier-Stokes)، وأظهرت النتائج وجود تطابق بين الجزء النظري و العملي.

أما الباحث (**Lee, 1986**) فقد اعتمد على نتائج القياسات الموقعية لجريان اضطرابي من نوع غاز- صلب لغرض حساب معامل الإعاقة المـــرن للصلب علـى مدى واسع من ظروف الجريان، قطر الصلب من (0.0001 m) إلى (.003 m) ، ونسبة تحميل من (1.06) إلى (1.2)، سرعة نسبية من (0.53 m/s)إلى (11.8 m/s) و استنتج أن إعاقة الصلب يمكن وصفه بواسطة قانون الإعاقة لستوكس (Stokes drag law) المبني على اللزوجة الاضطرابية للمائع في جريان غاز- صلب حيث تعتمد معادلات اللزوجة علـى شكل و حجم الجسيمة الصلبة وعلى تركيزها ورقم رينولد المحلي و على نسبة الصلب إلى المائع، واعتمد الباحث على قانون ستوكس المبني على جريان طباقي يعترضه جسم مفرد كروي الشكل لإيجاد تقريب لجريان ثنائي الطور

$$CD = \frac{p_p}{\left(\frac{1}{2}\rho_f U_r^2\right)\frac{1}{4}\pi d_p^2}$$

طبق الباحثون(**Bolio et. Al ,1996**) نفس عملهم السابق على الذي يعالج جريان ثنائي الطور من نـــوع غاز- سائل على جريان غاز – صلب اضطرابي بنسبة تحميل قليلة ، وقد اوجدوا معادلتين

لتوضيح تأثير وجود الطور الصلب في جريان ثنائي الطور اضطرابي مخفف ولرقم رينولد منخفض ، وأظهرت النتائج النظرية توافق كبير مع البيانات التجريبية بالنسبة للسرعة المتوسطة والمتذبذبة .

درس الباحثان (**Lun & Lin, 2004**) تأثير التصادم بين الدقائق الصلبة على حركتها في جريان ثنائي الطور من النوع الاضطرابي في أنبوب أو قناة ، وبينا أن هنالك آليتان لتفسير الاصطدام بين الدقائق الصلبة مع احتكاك الانزلاق وبدونه وان علاقات مركبات السرع المختلفة تعتمد عليها ويكون التحليل بثلاثة أبعاد ، زاويتان والمسافة بين مركزي التصادم .

تم تحليل عملية تدفق الغاز المحمل بالجزيئات الصلبة خـلال فوهـة نظريـا مـن قبـل الباحـث (**Osama, 2005**) وأجريت الحسابات لمعرفة العوامل المؤثرة على الجريان استنادا على التحليل الأحادي البعد والحل العددي للمعادلات الحاكمة . حيث تركز البحث على حساب تأثيرات اختلاف الـضغط وتوزيـع درجة الحرارة والسرعة خلال الفوهة بالنسبة للهواء فقط وللهواء المحمل بالصلب مستندة إلى معدل معين من جريان كتلة ونسبة تحميل معينة. تم تحديد تـأثير نـسب التحميـل (٠ ، ٠.٥ ، ١.٥٦ ، ٢.٧٣ ، ٣.٤١ ، ٦.٣٩) على هبوط الضغط وتوزيع سرعة الغاز والصلب ودرجات الحرارة و لقطر جزيئـه مـساويا إلـى (٣٦٠µm) ولمعدل تدفق غاز (39.5kg/s**)** كذلك تمت معرفة مدى تأثير قطر الجزيئـات الـصلبة علـى توزيع سرعة الغاز والصلب ودرجات الحرارة و لنسب تحميل مختلفة ولنفس معدل التدفق للغاز والمشار إليه آنفا.

التحليل النظري:

يتم تحليل تصرف جريان ثنائي الطور من نوع غاز- صلب وذلك بالاعتماد على معادلات حفظ الكتلة و الزخم والطاقة حيث تم اعتماد طريقة [1] (physico – computational model) لحل جريان شبه أحادي البعد لغاز– صلب وبسرعـــة تحت سرعة الصوت، و يستخدم هذا الطراز من خلال المتغيرات المحافظـــــة (conservative variables) التي تعامـل ظاهرة الروابط بين الجسيمات و الغاز من خلال مفهوم مصدر تأثير الصلب على الغــــــــاز (source term) و كل هذا يطبق على الحجم المسيطر (control volume). وقد اعتمدت الفرضيات التالية للتحليل:

١. الغاز يعامل على انه من النوع المثالي.
٢. الحرارة النوعية للغاز والصلب ثابتة .
٣. ان الجسيمات الصلبة تكون مكورة و منتظمة الشكل .
٤. الصلب يملك موصلية حرارية عالية و كتلة صغيرة اي ان درجة حرارته منتظمة .
٥. الحجم المحجوز من قبل الجسيمات الصلبة مهمل .
٦. إن قوة الإعاقة هي الوحيدة المسؤولة عن تعجيل أو تبطئ الجسيمات الصلبة .
٧. إن التبادل الحراري الحاصل بين الصلب والغاز يكون عن طريق الحمل .

٨.إن الجريان أحادي البعد ومستقر .

٩.لا توجد إضافة أو طرح للكتلة أو الطاقة من والى النظام .

المعادلات الأساسية :

بافتراض أن جريان شبه أحادي البعد ثنائي الطور في مجرى مساحته العرضية تتغير بانتظام وأن الحجم المسيطر محدد بجدران المجرى و النقطتيـــــن (١ & ٢) الموضـحة بالشكل(١)

إن مبدأ حفظ الكتلة لجريان مستقر يمكن أن يطبق هنا وحسب معادلة حفظ الكتلة(**Zucker et. al, 2002**):

$$\rho_2 u_2 A_2 = \rho_1 u_1 A_1 + \Delta \dot{m}_p \qquad (1)$$

كما أن مبدأ حفظ الزخم للجريان خلال الحجم المسيطر يمكن أن يكتب بالصيغة الآتية وحسب معادلة حفظ الزخم **(Zucker et. al, 2002)**

$$\rho_2 u_2^2 A_2 - \rho_1 u_1^2 A_1 = +p_1 A_1 - p_2 A_2 + \left(\frac{p_1 + p_2}{2}\right)(A_2 - A_1) + \Delta M_p - f_{wx} \qquad (2)$$

وكذلك من خلال فهم مبدأ حفظ الطاقة يمكن كتابة معادلة الطاقة للحجم المسيطر كالآتي **Zucker et. al, 2002**):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \rho_2 u_2 A_2 \left(h_2 + \frac{u_2^2}{2}\right) - \rho_1 u_1 A_1 \left(h_1 + \frac{u_1^2}{2}\right) - \Delta \dot{E}_p \qquad (3)$$

تحويل المتغيرات :

بعد تدقيق النظر في هيكل الثلاث معادلات الأساسية لجريان أحادي البعد نلاحظ وجود المتغيرات التالية :

$$\rho u A \;,\; pA \;,\; \rho u^2 A \;\;\&\;\; \rho u A \left[h + \left(\frac{u^2}{2}\right)\right]$$

وعند التمعن في هذه المتغيرات فإننا نلاحظ غياب مصدر تأثير الصلب الناتج من انتقال الحرارة و الاحتكاك عند الجدار. ومن تعريف قوانين حفظ الكتلة والزخم والطاقة

$$\dot{m} = \rho u A \tag{4}$$

$$\text{Impulse function (F)} = pA + \rho u^2 A = pA + \dot{m}\,u \tag{5}$$

$$h_o = \left(h + \frac{u^2}{2} \right) \rho u A \tag{6}$$

ويفرض طور الغاز علـ ـ ـى انه غاز حراري مثالي ، حيث يمكن التعبير عن المحتوى الحراري كما يلي :

$$h = C_g T_g = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(\frac{p}{\rho} \right) \tag{7}$$

نعوض المعادلة رقم (7) بالمعادلة رقم (6) نحصل على ما يأتي:

$$h_o = \dot{m} \left[\left(\frac{k}{k-1} \right) \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right] \tag{8}$$

نعوض المعادلة رقم (5) في المعادلة رقم (٨) و نحل بالنسبة إلى سرعة الغاز (u):

$$u = \left(\frac{k}{k+1} \right) \left(\frac{F}{\dot{m}} \right) \left[1 \pm \sqrt{1 + 2 \left(\frac{1-k^2}{k^2} \right) \left(\frac{\dot{m}\ h_o}{F^2} \right)} \right] \tag{9}$$

حيث أن الإشارة السالبة للجذر تمثل جريان اقل من سرعة الصوت، أما الإشارة الموجبة فإنها تمثل جريان فوق سرعة الصوت . يستفاد من المعادلة رقم (٩) لحساب سرعة الغاز ، أما المعادلة رقم (٥) فيحسب من خلالها الضغط .

تأثير الطور الصلب على الزخم:

$$\Delta \dot{M}_p = \dot{m}_p (v_1 - v_2) = z\ \dot{m}_g (v_1 - v_2) \tag{10}$$

إن سرعة الجسيمات تحسب من خلال التكامل لمعادلة حركة الجسيمات(**Govier, 1972**)

$$m_p \frac{dv}{dt} = CD_p (u - v)|u - v| \frac{A_p}{2} + m_p g \tag{11}$$

إن القوى الايروداينمكيه للجسيمات مثل تدرج الضغط و توزيع الكتلة مهملة و ذلك لان نسبة تأثيرها قليل (اقل من الواحد بالألف) ، بالإضافة إلى كون قوة الجسم في الجريان الأفقي هي أيضاً مهمله، كذلك التصادم بين الجسيمات فهو مهمل لهذا التطبيق[1] لذا فان معامل الإعاقة للجسيمات يعتمد على رقم رينولد للجسيمات مبني على السرعة النسبية بين الغاز و الصلب .

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho |u - v| d}{\mu} \tag{12}$$

للجسيمات (أو القطرات غير المتبخرة) فأن معامل الإعاقة يمثل الآتي (**Lee. S.L., 1987**) :

$$CD = \left(\frac{24}{\mathrm{Re}}\right)\left(1 + .15\,\mathrm{Re}^{0.687}\right) \tag{13}$$

لرقم رينولد اقل من (١٠٠٠) فأن المعادلة(١١) معادلة الحركة للجسيمات تكون بالصيغة الآتية :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{18 \mu f}{\rho_p d^2}(u - v) + g \tag{14}$$

حيث :

$$f = CD \left(\frac{\mathrm{Re}}{24}\right) \tag{15}$$

تعرف خاصية الزمن الديناميكية للجسيمات بالصيغة التالية:

$$\tau_d = \frac{\rho_p d^2}{18 \mu f} \tag{16}$$

بعدها نستطيع كتابة معادلة الحركة للجسيمات كالآتي :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau_d}(u - v) + g \qquad (17)$$

تكامل المعادلة أعلاه على فرض أن سرعة الغاز بين النقطتين (٢ & ١) تتغير خطياً و بذلك نستطيع إيجاد معادلة تمثل سرعة الصلب عند أي نقطة ، وتكتب بالصورة الآتية:

$$v_2 = u_2 + g\tau_d - \left[\left((u_1 - v_1) + g\tau_d\right)\exp\left(-\left(\frac{\Delta x}{v_1\tau_d}\right)\right) - \frac{\Delta u}{\Delta x}v_1\tau_d\left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{v_1\tau_d}\right)\right)\right] \qquad (18)$$

تأثير الجسيمات الصلبة على الطاقة:

إن التناقص في طاقة الجسيم أثناء انتقاله بين النقطتين (٢ & ١) يمكن أن يمثـل كمـا يليـ د [**Govier, 1972]:**

$$\Delta E_p = z\,\dot{m}g\left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2}\right) + z\,\dot{m}g\,Cp\left(t_{p1} - t_{p2}\right) \qquad (19)$$

أما التغير في درجة حرارة الجسيمات تمثل بالمعادلة التالية [**Govier, 1972]:**

$$m_p\frac{d(cp\,t_p)}{dt} = h_c(4\pi d^2)(t_g - t_p) \qquad (20)$$

على فرض انتظام الحرارة للجسيم فإن معادلة الطاقة للجسيمات تبسـ ـ ـ ـ ـط إلـى مـا يلـي[**Govier, 1972]:**

$$\frac{dt_p}{dt} = \left(6Nu\frac{k}{d^2\rho_p cp}\right)\left(t_g - t_p\right) \qquad (21)$$

الخاصية الحرارية للجسيم المتغيرة مع الزمن تمثل بالشكل التالي [Bolio et. al, 1996]

$$\tau_g = 3\left(\frac{pr}{Nu}\right)\left(\frac{cp}{cg}\right)f\,\tau_d \qquad (22)$$

معادلة الطاقة للجسيمات يمكن أن تكتب على النحو التالي [Bolio et. al, 1996] :

$$\frac{dt_p}{dt} = \frac{t_g - t_p}{\tau_g} \qquad (23)$$

وإذا افترضنا أن التغير في درجة حرارة الغاز هو تغير خطي فإننا نستطيع أن نكامل المعادلة أعلاه والحصول على معادلة تمثل درجة حرارة الجسيم عند أي نقطة:

$$t_{p2} = t_{g2} + \left(t_{g1} - t_{p1}\right)\exp\left(-\frac{\Delta x}{v_1 t_g}\right) - \frac{\Delta t_g}{\Delta x} v_1 t_g \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{v_1 t_g}\right)\right] \qquad (24)$$

إن رقم ناسلت يمثل الحرارة المنتقلة من و إلى الجسيم و يعتمد على رقم رينولد للجسيـــم و على رقم برانتل للغاز لذلك يعبر عن رقم ناسلت بالمعادلة التالية[Balasim, 2005]

$$Nu = 2 + 0.459\,\mathrm{Re}^{o.55}\,pr^{0.33} \qquad (25)$$

تطبق المعادلة أعلاه عند قيم محدد لرقم برانتل ($pr < 0.7$) و رقم رينولد ($1000 > \mathrm{Re}_p$)

طريقة إجراء الحسابات :

تم إعداد برنامج على الحاسوب يستخدم لحل معادلات جريان غاز– صلب خلال أنبوب فنتوري. وكانت البيانات المطلوبة لتشغيل البرنامج هي معدل تدفق الغاز ونسبة التحميل وسرعة الغاز والصلب وضغط الجريان عند الدخول بالإضافة إلى درجات الحرارة للغاز والصلب مع مساحات المقطع العرضي للدخول والخروج.

أما قيم الثوابت المستخدمة للهواء فهي [Holman, 2007]

R= 0.287 (kJ/kg.K) .

g = 9.81 (m/s^2) .

μ = 18.6 (N.s/m^2)

k = 0.024(kJ/m.s.K)

وقيم الثوابت المستخدمة للطور الصلب هي :

Cp = 0.903 (kJ/kg.s) .

dp= 100 μm

ρ_p = 2450 (kg/m3)

النتائج و المناقشة:

١. تأثير نسبة التحميل على خسارة ضغط الجريان والسرعة و درجة الحرارة لكلا الطورين :

إن **الأشكال (٢ إلى ٤)** تظهر مدى تأثير نسبة التحميل على خسارة الضغط والتغير الحاصل في سرعة الصلب و الهواء و درجة حرارة كلا الطورين وعلى طول محور الجريان خلال أنبوب فنتوري وباستعمال نسب تحميل هي (٠.٥، ٢، ٤) على التوالي وعند قطر (100μm) للجسيمات الصلبة ومعدل تدفق الهواء هو (0.6kg/s). ونستنتج من الأشكال أعلاه انه بزيادة نسبة التحميل فان الخسارة بالضغط سوف تزداد ، أما بالنسبة إلى سرعة الهواء والصلب فأن الزيادة بنسبة التحميل تؤدي إلى نقصان ملحوظ في سرعة الهواء وسرعة الجزيئات الصلبة التي يحملها الهواء .

وكما هو مبين بالأشكال المذكورة فأن هبوط الضغط في منطقة التقارب لمقياس فنتوري يزداد بزيادة نسبة التحميل، كذلك هو الحال في منطقة العنق، ويكون استرداد الضغط في منطقة التباعد لمقياس فنتـوري اقل كلما زادت نسبة التحميل . أما بالنسبة لسرعة الهواء فأن نقصانها في منطقة التقارب مرهـون بزيـادة نسبة التحميل، وكذلك هو الحال عند العنق، أما الزيادة بالسرعة في الناشر فتقل بزيادة نسبة التحميل . الكلام نفسه ينطبق على سرعة الجزيئات الصلبة .

٢. تأثير حجم الجزيئات الصلبة على خسارة ضغط الخليط وسرعة و درجة حرارة كلا الطورين :

الأشكال (٥ إلى ٧) تظهر التغير الحاصل لضغط الخليط وسرعة ودرجة حرارة كلا الطورين على طول محور الجريان داخل المقياس عند قطرين للصلب هـ ـي (٥٠ و٢٠٠) مايكرون وعند نسبة تحميل هي (٤)، وبنفس معدل التدفق للهواء (0.6 kg / s) وعند نسبة خنق هي (٥٠ %) وبنسبة نشر هـ ـي (٢٠٠ %).

ومن الأشكال أعلاه نستنتج أن نقصان حجم الدقائق الصلبة التي يحملها الهواء يؤدي إلى زيادة بخسارة ضغط الخليط وذلك بسبب زيادة رقم ستوكس (stokes number) وبالنسبة إلى سرعة الهواء فأن نقصان أحجام الجزيئات الصلبة يسبب زيادة بسرعة الهواء والعكس صحيح بالنسبة إلى سرعة الجزيئات الصلبة ، حيث أن أي زيادة بحجم الجزيئات معناها نقصان بسرعة هذه الجزيئات .

من **الأشكال (٥ إلى ٧)** نلاحظ أن زيادة حجم الجسيمات الصلبة معناه نقصان في خسارة ضغط الجريان في منطقة التقارب للأنبوب، ونفس المبدأ ينطبق على منطقة العنق، أما في منطقة التباعد فأن استرداد الضغط الضائع يكون بنسبة اقل في حالة زيادة حجم الجزيئات الصلبة المنقولة بالهواء. ونلاحظ أن سرعة الهواء في منطقة التقارب تزداد مع زيادة حجم الجسيمات، ويكون نقصان السرعة عند العنق في تزايد كلما زاد حجم الجزيئات الصلبة، أما في الناشر فأن زيادة الحجم تؤدي إلى تقليل الخسارة في السرعة.

وبالنسبة إلى سرعة الطور الصلب فأن أي زيادة في حجم الجزيئات الصلبة عند منطقة التقارب معناها نقصان في سرعة الصلب، كذلك الحال عند العنق ، أما في منطقة التباعد فالأمر معكـوس تماما.

٣. العلاقة بين الطورين من حيث السرع و درجة الحرارة:

لغرض توضيح العلاقة بين الطورين لابد من مقارنة سرعهما ودرجة حرارتهما وعند ظروف مختلفة، فإذا أمعنا النظر في **الشكلين (٨ و ٩)** نلاحظ أن علاقة سرعة الهواء بسرعة الجزيئات الصلبة تأخذ تقريباً نفس الشكل وذلك عند وأكثر من حجم للجسيمات الصلبة ، ومن أهم ما يلفت النظر هو أن استمرار تزايد سرعة الطور الصلب في العنق والناشر على الرغم من الهبوط الحاصل لسرعة الهواء والسبب في ذلك يعود إلى كون الفرق الكبير في السرع الناتج عند منطقة التقارب لأنبوب فنتوري حيث أن الهواء يميل إلى التعجيل بنسبة اكبر من الصلب وعند الوصول إلى العنق و من ثم الناشر يكون زخم الهواء أعلى من الصلب لذلك يستمر الصلب باكتساب التعجيل من الهواء على الرغم من التباطؤ الحاصل له إلى أن يصل إلى حالة الاستقرار ، ونفس الكلام يمكن أن ينطبق على علاقة درجة الحرارة لكلا الطورين فنلاحظ أن درجة حرارة الهواء تتغير بشكل كبير وحسب ظروف الجريان بينما درجة حرارة الطور الصلب تكون ذات تغير طفيف يكاد لا يلمس إذا ما قورن بتغير درجة حرارة الهواء .

٤. مقارنة النتائج مع نتائج البحوث السابقة :

قورنت نتائج هذه الدراسة مع نتائج بحوث سابقة [Balasim, 2005] مع العلم أن هـذا المـصدر خاص بدراسة الجريان الثنائي الطور خلال مقياس فوهة وليس أنبوب فنتوري لكن المبدأ واحد وهو تقـديم منطقة جريان ثنائية الطور غير متوازنة، لذا اعتمد لمقارنة نتائج هذه الدراسة والتي تخص منطقة التقـارب لمقياس فنتوري ، وقد لوحظ تشابه كبير من حيث التصرف .

نبدأ بالمقارنة **بالشكل (١٠)** حيث نلاحظ أن هبوط الضغط يزداد بزيادة نسبة التحميل. أمـا تـأثير حجم الصلب على سرعة الطور الصلب وعلى طول محور الجريان للمصدر [**Balasim, 2005**] فهـو مشابه من حيث التصرف للعمل الحالي وكما المبين **بالشكل (١١)**.

الشكل (١٢) يبين مقارنة لسرعتي الطورين ونلاحظ من خلاله التشابه في علاقة سرعة الجزيئـات الصلبة مع سرعة الغاز الحامل لتلك الجزيئات لكلا البحثين، ومن المقارنة أعلاه نلاحظ أن تـسارع الهـواء الحامل للجزيئات الصلبة يكون بنسبة اكبر من تسارع الجزيئات الصلبة. **الشكل (١٣)** يوضح طبيعة علاقـة درجة حرارة الطور الصلب مع درجة حرارة الطور الحامل له (الهواء) عند نسبة تحميـل (٠.٥)، حيـث نلاحظ فرق كبير بين درجة حرارة الطورين، وهو نفس التصرف لدرجة حرارة الطورين للبحث الحالي.

الاستـنتاجات:

١. بزيادة نسبة التحميل (z) يزداد هبوط الضغط وتزداد نسبة هبوط الضغط (p / po) على شرط ثبوت حجم الجسيمات الصلبة .

٢. بزيادة نسبة التحميل وثبوت حجم الجسيمات الصلبة فأن سرعة الهواء سوف تقل وكذلك بالنسبة إلى سرعة الطور الصلب .

٣. إن زيادة حجم الجسيمات الصلبة يؤدي الى نقصان في هبوط الضغط ، اما في حالة نقصان حجم هذه الجسيمات فأن هبوط الضغط سوف يزداد .

٤. درجة حرارة كلٍ من الهواء والصلب تقل بزيادة نسبة التحميل وثبوت حجم الصلب ويكون النقصان بدرجة حرارة الصلب قليل جداً ، اما النقصان في درجة حرارة الهواء فيكون تابع الى مقدار هبوط الضغط .

٥. ان زيادة حجم الجسيمات الصلبة يسبب نقصان في سرعة الطور الصلب .

٦. تزداد درجة حرارة الطور الصلب وبشكل طفيف مع زيادة حجم الجسيمات الصلبـة ، اما بالنسبة الى درجة حرارة الهواء فأنها تزداد مع زيادة حجم الجسيمات الصلبة وتكون الزيادة مرتبطة بضغط الجريان

المصادر

1.Sharma , M . P . , Crowe , C . T . " A NOVEL PHYSICO – COMPUTATIONAL MODEL FOR QUASI ONE – DIMENTIONAL GAS – PARTICLE FLOW " Journal of Fluids Engineering , Vol . 100 , pp 343 – 349 , 1978 .

2. Lee, J., Crowe, C.T. "SCALING LAWS FOR METERING THE FLOW OF GAS – PARTICLE SUSPENSIONS THROUGH VENTURI" ASME, J. of Fluids Engineering, Vol.104, PP 88-91,1982 .

3.Cramp, W. & Priestly, A. "PNEUMATIC GRAIN CONVEYORS", Engineer, 137, 34, 64, 1924.

4. Govier, G.W & Aziz, K. "THE FLOW OF COMPLEX MIXTURES IN PIPES" Textbook, 1st edition, 1972.

5.Farbar, L.& Morley, M.J. "HEAT TRANSFER EFFECTS TO GAS-SOLID MIXTURES IN A CIRCULAR TUBE" Ind. Eng. Chem. Vol. 49,1143-1150, 1957

6.Doig, I.D.& Roper, G.H. "THE MINIMUM GAS RATE FOR DILUTE PHASE SOLIDS TRANSPORTAION IN A GAS STREAM" Aust. Chem. Eng.4, 9-23,1963.

7.Efstathios E . Michaelides " A MODEL FOR THE FLOW OF SOLID PARTICLES IN GAS " Int . J . Multiphase Flow , Vol . 10 , No . 1 , pp 61 – 77 , 1984 .

8.Lee , S . L."PARTICLE DRAG IN DILUTE TURBULENT TWO – PHASE SUSPENSION FLOW " Int . J . Multiphase Flow , Vol . 13 , No . 2 , pp 247 – 256 , 1987 .

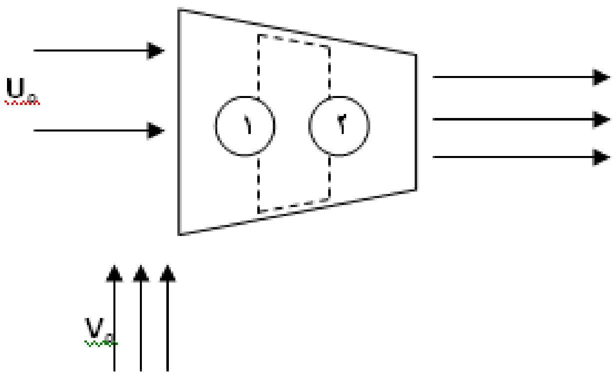
9.Bolio , E . J . , Yasuna , J . A . and Sinclair , J . L . “ DILUTE TURBULENT GAS – SOLID FLOW IN RISERS WITH PARTICLE - PARTICLE INTERACTIONS ” Int . J . Multiphase Flow , Vol . 22 , No . 1 , p . 94 , 1996 , http: // www . sciencedirect . com .

10. Lun , C .K . K . , Lin , H . S . “ ANALYTICAL APPROACH FOR THE CLOSURE EQUATION OF GAS – SOLID FLOW WITH INTER – PARTICLE COLLISIONS ”. Int . J . Multiphase Flow , Vol . 30 , Issue 2 , pp. 159 - 180 , 2004 , http: // www . sciencedirect . com .

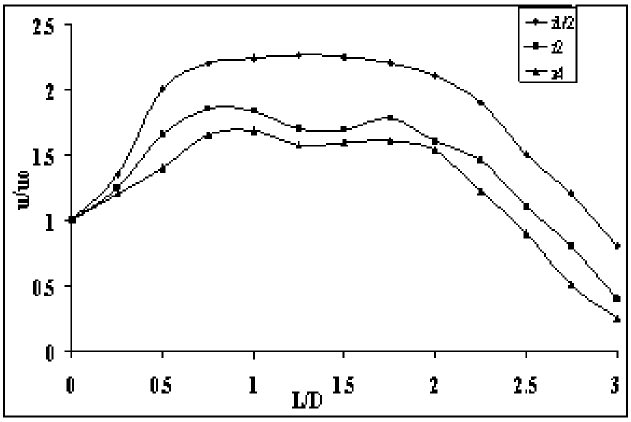
11. Osama Balasim “ EFFECT OF DUST MASS RATIO ON FRICTION COEFFICIENT INMULTIPHASE FLOW ”M.Sc thesis AL-Nahrain University 2005

12. Holman, J.P. “HEAT TRANSFER”. Textbook, ninth edition, 2007.

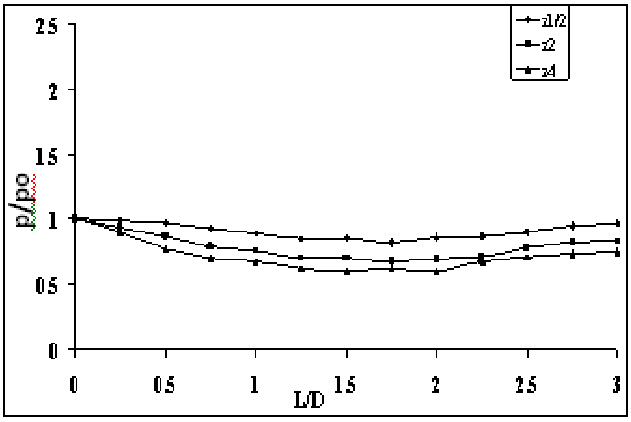
13. Zucker, R.D. & Biblarz, O. “FUNDAMENTALS OF GAS DYNAMICS”.Textbook, 2nd edition, 2002.



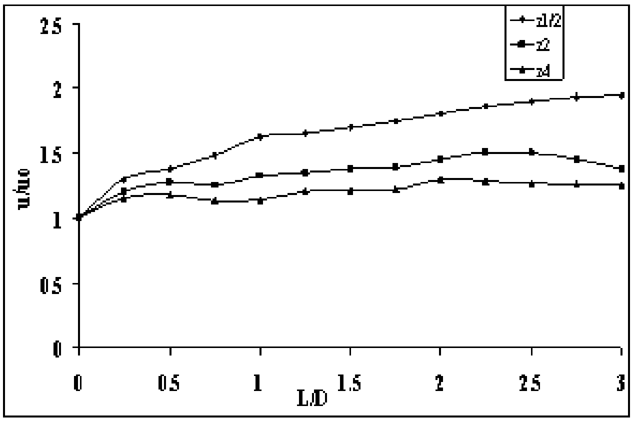
شكل ١ يبين شكل الجهاز المستخدم في البحث



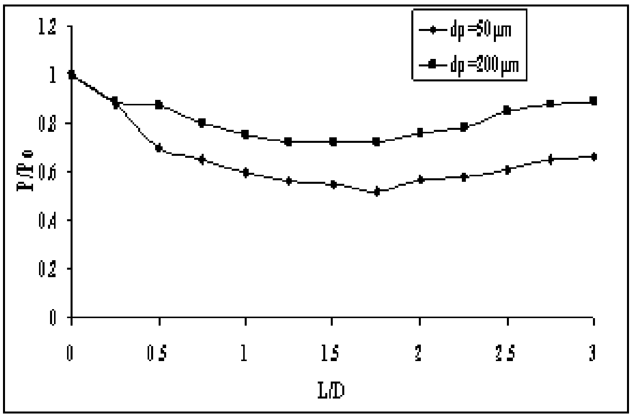
شكل ٢ سرعة الهواء على طول محور الجريان ولعدة نسب تحميل ولقطر (100µm) للجسيم



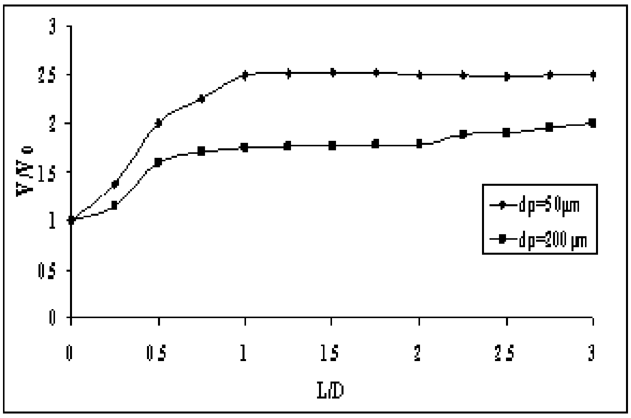
شكل ٣ تغير ضغط الجريان على طول محور الجريان ولعدة نسب تحميل ولقطر (100µm) للجسيم



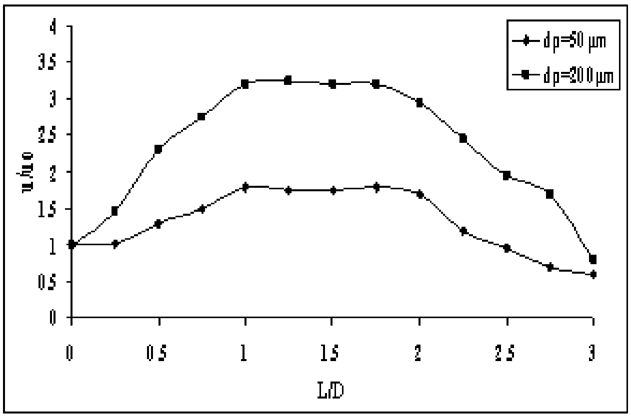
شكل ٤ تغير سرعة الطور الصلب على طول محور الجريان ولعدة نسب تحميل ولقطر (100µm) للجسيم



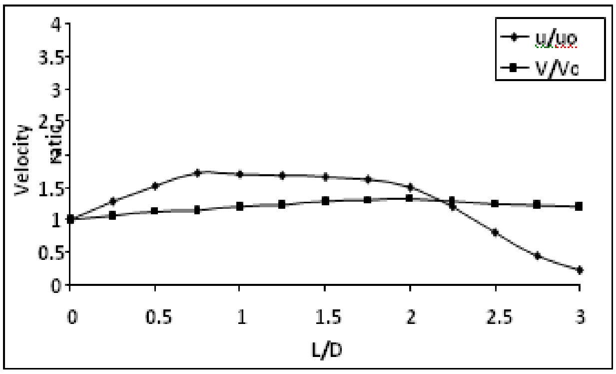
شكل ٥ تغير ضغط الجريان على طول محور الجريان عند نسبة تحميل (4)



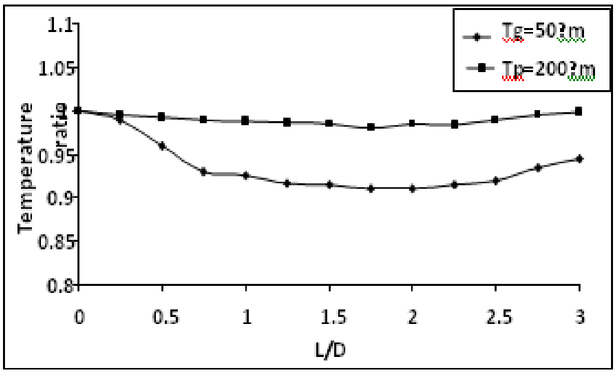
شكل ٦ تأثير حجم الجسيمات الصلبة على سرعة الصلب عند نسبة تحميل (4)



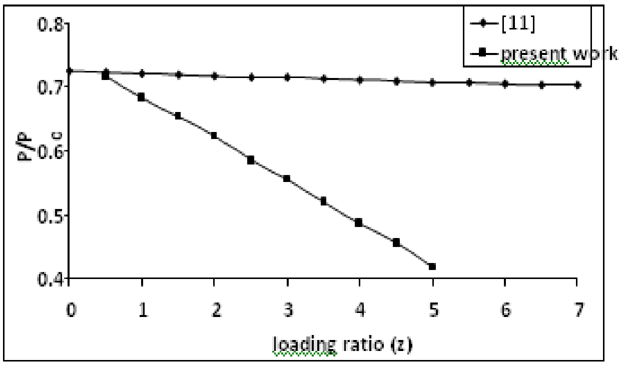
شكل ٧ تأثير حجم الجسيمات الصلبة على سرعة الهواء عند نسبة تحميل (4)



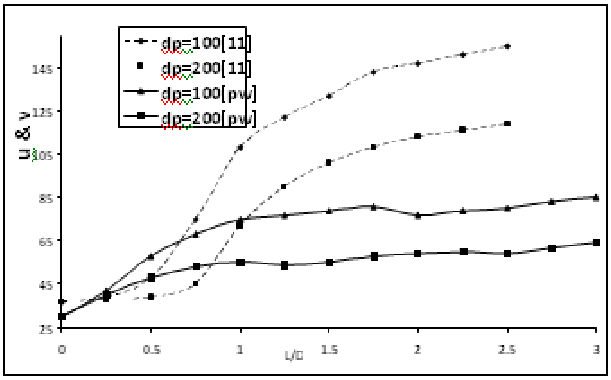
شكل ٨ العلاقة بين سرعتي الأطوار عند نسبة تحميل (4) ولقطر (100μm) للجسيم



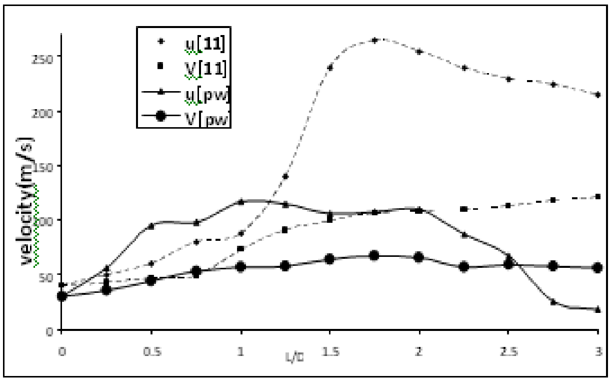
شكل ٩ العلاقة بين درجات حرارة الأطوار عند نسبة تحميل (4) ولقطر (100μm) للجسيم



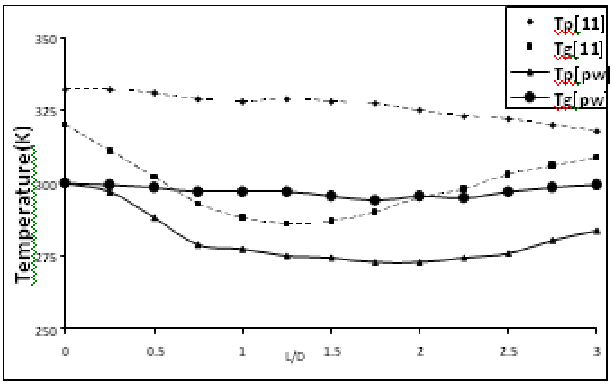
شكل ١٠ مقارنة للعلاقة بين هبوط الضغط ونسبة التحميل للعمل الحالي والمصدر [11]



شكل ١١ مقارنة لتأثير حجم الجسيمات الصلبة على سرعة الصلب عند نسبة تحميل (0.5) للعمل الحالي والمصدر [11]



شكل ١٢ مقارنة لسرعتي الاطوار عند نسبة تحميل (0.5) للعمل الحالي والمصدر [11]



شكل ١٣ مقارنة لدرجة حرارة الطورين عند نسبة تحميل (0.5) للعمل الحالي والمصدر [11]