

## Simulation and Analysis of Flow Process in Pneumatic Conveyors in Syrian Ports

Dr. Latifa Alhamwi\*  
Dr. Ahmad Salameh\*\*  
Mohammed Abbas\*\*\*

(Received 16 / 6 / 2021. Accepted 22 / 3 / 2022)

### □ ABSTRACT □

The behavior of the flow of particles of the material transported through the air flow varies according to the type of material and the parameters of the conveyor, including the productivity and the dimensions of the conveyor. In This research, the optimal state of wheat flow in the **Vigan 200** pneumatic conveyor in Lattakian port was studied by comparing the flow patterns results of several parameters and shapes of the transported wheat and studying the effect of each of them on the conveyor pipes and focusing on the curved parts of the pipes.

Flow and erosion have been simulated by DEM-CFD method using Ansys fluent and Rocky DEM, the effect of shape and dimension changing on the erosion of the bend part of the tube, normal and tangential forces of particle- particle, have been studied, the results showed that in case of wheat particles , both of normal and tangential forces increased in bend , and gradually decreased in the horizontal pipe and the particle flow was more stability in vertical and bend pipes but a dune flow was observed in horizontal pipe, whereas normal and tangential forces significantly decreased in case of spherical particles which flow in small groups in vertical, bend and horizontal pipes.

These simulations showed the great influence of particle size, shape and initial air velocity on the behavior of wheat particles flow, the results also showed that the erosion values decreased and behavior of the flow approaches the optimum state when rectangular bend was used instead of the cylindrical one when the initial air velocity reached 17.5 m/s.

**Keywords:** DEM-CFD , particle flow , erosion , drag force , dune flow.

---

\* Associate Professor, Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. [drhamwi1@hotmail.com](mailto:drhamwi1@hotmail.com)

\*\* Associate Professor, Department of Design and Production Engineering, College of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. [salamahahmad@gmail.com](mailto:salamahahmad@gmail.com)

\*\*\* Postgraduate Student (MSc), Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.. [hamodvabbass12@hotmail.com](mailto:hamodvabbass12@hotmail.com)

## محاكاة وتحليل عملية التدفق في الناقل البنيوماتيكي في المرفأ السورية

د. لطيفة الحموي\*

د. أحمد سلامة\*\*

محمد عباس\*\*\*

(تاريخ الإيداع 16 / 6 / 2021. قُبل للنشر في 22 / 3 / 2022)

### □ ملخص □

يختلف سلوك تدفق حبيبات المادة المنقولة خلال الهواء تبعاً لنوع المادة وبارامترات الناقل بما فيها الإنتاجية وأبعاد الناقل. في هذا البحث تم دراسة السلوك الأمثل لتدفق مادة القمح في الناقل البنيوماتيكي Vigan 200 الموجود في مرفأ اللاذقية من خلال مقارنة نتائج عملية التدفق لعدة بارامترات وأشكال حبيبات القمح المنقولة ودراسة تأثير تلك الحبيبات على أنابيب الناقل والتركيز على الأجزاء المنحنية من الأنابيب. تم نمذجة كل من التدفق والتآكل باستخدام طريقة (DEM) Discrete element method وطريقة Computational fluid Dynamics (CFD) من خلال برنامج Ansys fluent and Rocky DEM وإيجاد تأثير تغير كل من الشكل والأبعاد على تآكل الجزء المنحني من الأنبوب مع أخذ كل من القوى المماسية والناظمية بعين الاعتبار وبينت النتائج أن كلاً من القوى النازمية والمماسية تزداد في منطقة الانحناء وتتنخفض تدريجياً في القسم الأفقي في حالة حبيبات القمح بينما تنخفض قيم هذه القوى بشكل ملحوظ في حالة الحبيبات الكروية كما لوحظ تدفق الحبيبات بشكل مستقر في القسم العمودي ومنطقة الانحناء بينما كان التدفق موجي الشكل في القسم الأفقي من الأنبوب في حالة حبيبات القمح بينما انتقلت الحبيبات ذات الشكل الكروي بشكل تجمعات صغيرة في كل من القسم العمودي والأفقي والانحناء. وأظهرت عمليات النمذجة هذه التأثير البالغ لطول الحبيبة وشكلها وحجمها والسرعة الابتدائية للهواء على سلوك تدفق حبيبات القمح كما بينت النتائج أن قيم التآكل تنخفض وسلوك التدفق يقترب من الحالة المثلى عند استخدام الانحناء ذو المقطع المستطيل بدلاً عن المقطع الدائري وذلك عند سرعة ابتدائية للهواء تبلغ  $17.5 \text{ m/s}$ .

**الكلمات المفتاحية:** DEM-CFD، تدفق الحبيبات، التآكل، قوة السحب، التدفق الموجي.

\*أستاذ مساعد، قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

[drhamwi1@hotmail.com](mailto:drhamwi1@hotmail.com)

\*\*أستاذ مساعد، قسم التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

[salamahamad@gmail.com](mailto:salamahamad@gmail.com)

\*\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير)، قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

[hamodyabbass12@hotmail.com](mailto:hamodyabbass12@hotmail.com).

**مقدمة:**

تلقي آلات النقل البنيوماتيكية رواجاً واسعاً في مختلف المجالات الصناعية و الزراعية. تتحرك المادة في هذه الآلات بتأثير تيار هواء ضمن أنبوب بسبب فرق الضغط بين بداية ونهاية الأنبوب، وتستخدم كآلات تفريغ في القطارات وفي النقل البحري.[3] تصل انتاجية هذه الأنظمة إلى  $(200 - 300) t/h$ ، وتصل مسافة النقل الفعلية إلى عدة مئات من الأمتار. تتميز هذه النواقل بالإحكام، وعدم هدر المادة، وبساطة التصميم الميكانيكي، والفعالية العالية لنقل المواد المختلفة (مواد غذائية، مواد بناء،.....).

أهم خواص النواقل البنيوماتيكية:

1. إمكانية نقل المواد أفقياً، أو بشكل مائل أو شاقولياً.
2. سهولة التركيب بالنسبة للأماكن الضيقة، حيث أن نقل المواد يمكن أن يتم بأنابيب ذات أقطار غير كبيرة.
3. إمكانية القيام بعدة عمليات تكنولوجية بنفس الوقت، مع عملية النقل كعملية التجفيف.
4. إمكانية التفريغ في عدة مناطق والاستقبال من عدة مناطق.
5. الانتاجية الكبيرة ومسافات النقل الكبيرة.

أهم عيوب النواقل البنيوماتيكية:

1. الاستهلاك الكبير للطاقة فهي أكبر ب (3-6) مرات من النواقل الأخرى.
  2. الاهتراء السريع لأجزاء الناقل.
- وبسبب التنوع الكبير للمواد المنقولة، والتي تشمل الأنواع المختلفة من الحبوب، أو مواد البناء (الحاكة أو الجافة أو القطعية)، تعددت أشكال تدفق المادة المنقولة، تبعاً لخصائصها، وطريقة نقلها (ماسة . دافعة . مختاطة)، والذي بدوره أدى إلى ظهور مشكلة تآكل أجزاء الناقل، ولا سيما الأجزاء المنحنية بسبب الاحتكاك العالي بين الحبيبات والأنبوب.[10] وتعد مشكلة تحديد سلوك تدفق حبيبات القمح، بما يحقق الانتاجية القصوى، ومشكلة تآكل الأجزاء المنحنية للناقل البنيوماتيكي، أحد أبرز النقاط التي تحدد كفاءة نقل الحبيبات ضمن نظام النقل ككل، إضافة إلى تأثير كل من سرعة الهواء وحجم الحبيبات المدروسة.[5]

**أهمية البحث وأهدافه:**

تكمن أهمية هذا البحث في الحصول على نظرة هندسية للعوامل المؤثرة في سلوك التدفق مع دراسة علاقتها بالتآكل الفيزيائي الحاصل في الجزء المنحني، استناداً إلى طرق رياضية، واستخدام تطبيقات حسابية لدراسة الحالة الحركية للحبيبة وبالتالي إيجاد الحالة المثلى، التي تحقق السلوك الأفضل للتدفق لعدة أنواع من الحبيبات المدروسة، انطلاقاً من معطيات الناقل البنيوماتيكي، من خلال محاكاة حركة الحبيبة المنقولة وبالتالي إمكانية الحصول على الصيغة المناسبة للتدفق، والتي تضمن سلامة كل من عملية النقل والأجزاء الميكانيكية للناقل.

**1- الدراسات المرجعية (Literature Review):**

تشكل حركة الجزيئة مؤشراً على شكل سلوك تدفق الحبيبات في أنبوب النقل، إضافة إلى شكلها وأبعادها، ففي عام 2009 قام (Paul W. CLEARY، James E. HILTON) بدراسة أهمية شكل الحبيبات حيث أجرى

الباحثان تجربتين تهتم الأولى بدراسة حبيبات كروية الشكل، بينما اهتمت التجربة الثانية بدراسة حبيبات بشكل قطع ناقص (متطاوول وبيضوي) وذات الشكل المكعبي.[4]

وأشارت نتائج هذه الدراسة أنه عند درجات منخفضة لقيم الضغط تكون حركة الحبيبات على شكل مجموعات ثابتة، وعندما يزداد تدرج الضغط يُلاحظ تدفق الحبيبات بشكل كتلي مع سرعة منخفضة للغاز، بينما في التجربة الثانية أدى تغير شكل الحبيبات إلى منع التجمعات من الحدوث، وكان التدفق بشكل موجي بسيط.

في عام 2014 درس كل من الباحثون ( J. Du, G. M. Hu, Z. Q. Fang, J Wang ) نمذجة الناقل البنويوماتيكي لأنواع مختلفة من الانحناءات باستخدام تطبيقي: CFD-DEM

وقد تم استخدام نموذج ثلاثي الأبعاد لثلاث أنماط من أنظمة الأنابيب: ( أفقي - عمودي ، عمودي - أفقي ، أفقي - أفقي ) [2] وبينت النتائج أنه في نظام (عمودي - أفقي) تتوضع الحبيبات المنقولة في مركز الأنبوب وذلك بفعل الجاذبية وفي النظام (أفقي - أفقي) تتوزع الحبيبات ضمن منطقة صغيرة حول الدائرة المحيطة للأنبوب، بينما في النظام (أفقي - عمودي) يُلاحظ تشتت عالي لتوزع الحبيبات، وتوضعت الحبيبات في مركز الأنبوب أيضاً.

في عام 2009 قام كل من الباحثان (M.patnel ، T.Deng) بدراسة تأثير التآكل الناتج عن تصادم الحبيبات الصلبة مع انحناء الأنبوب أثناء التدفق، وإمكانية تنبؤ الفشل الحاصل في انحناء أنبوب الناقل بفعل قوة الصدم، وإمكانية تحديد النقاط الحرجة والتي تدعى بنقاط الثقب في الانحناء. حيث تم استخدام أنبوب بقطر 5.5 mm وطول 80 mm، وأنصاف أقطار انحناء مختلفة.[9]

وأظهرت النتائج أن نقطة الثقب اختلفت باختلاف سماكة الانحناء، ومقدار التدفق الكتلي، كما أن موقع الانحناء ونصف قطر التقوس هو أحد العوامل الهامة في تغير موقع النقاط الحرجة، ولوحظ أن قوة الصدم العظمى وُجدت في الانحناء بزاوية قائمة (عمودي - أفقي) حيث تم بفعل الجاذبية تغيير نقاط صدم الحبيبات للأنبوب، والتي بدورها غيرت مواقع التآكل في انحناء الأنبوب على خلاف التآكل في النظام (أفقي - عمودي) حيث لوحظ نسب منخفضة من التآكل والنقاط الحرجة.

و درس كل من (B.Foute , Clariss , Lucillac) في عام 2015 تطبيق نموذج DEM - CFD باستخدام برنامج Rocky Dem و Ansys fluent حيث تم استخدام نموذج CFD للتعامل مع الطور المائع (الهواء)، ونموذج DEM للتعامل مع طور الحبيبات.[8]

تم تطبيق هذا الدمج على الأنبوب الخاص بفرز المواد الخفيفة من الثقيلة (wind shifter) وذلك باستخدام عدة قوانين سحب لعدة مواد منقولة مثل الورق والأحجار والمعادن والخشب وكتافات (800,3000,8000,900) وقوانين السحب المستخدمة كانت schiller & Naumann and Ganser.

وساعدت النتائج على حساب ضياع الضغط بين مدخل ومخرج النموذج لثلاث أحجام تجزئة مختلفة ( 0,35 0,4 - 0,5 ) ، وساعد هذا الدمج على الوصول إلى نموذج رياضي هندسي يؤمن فعالية نمذجة عالية في استخدام طريقة CFD - DEM للتنبؤ بسلوك الحبيبات.

### طرائق البحث ومواده:

تم تصميم النموذج الموافق باستخدام برنامج Solidworks وتطبيق طريقة CFD-DEM باستخدام برنامج Ansys fluent ، Rocky DEM ، وتم دراسة تأثير تغير الشكل، والأبعاد على تآكل الجزء المنحني من الأنبوب،

ودراسة التصادم بين الحبيبات وبينها وبين الأنبوب ويُستخدم برنامج Rocky Dem لنمذجة تدفق المواد الحبيبية أو الغبارية ودراسة القوى المتبادلة فيما بينها اعتماداً على قوانين نيوتن الأول والثاني بينما يُستخدم برنامج Ansys fluent لنمذجة الطور المائع وفقاً لقوانين ديناميك الموائع الحسابية.

## 2 - طريقة CFD-DEM:

بطريقة CFD-DEM يتم الحصول على تدفق المائع من خلال حل معادلات حفظ الكتلة والعزم والطاقة وذلك باستخدام طريقة CFD بينما يتم الحصول على تدفق الحبيبات باستخدام طريقة العناصر المنفصلة DEM وفي هذه الدراسة تم معالجة طور المائع (الهواء) من خلال برنامج Ansys ، بينما تم معالجة طور الحبيبات من خلال برنامج Rocky. ميزات استخدام طريقة CFD-DEM مقارنةً باستخدام طريقة CFD وحدها:

1. بطريقة DEM تتم نمذجة حركة كل حبيبة وبالتالي تؤخذ التفاعلات بين الحبيبات بعين الاعتبار على خلاف طريقة CFD .
2. تتيح طريقة DEM إمكانية نمذجة الحبيبات غير الكروية.
3. تتيح طريقة DEM إمكانية نمذجة المواد عالية اللزوجة من خلال حساب قوى التجاذب بين كل زوجين من الحبيبات.
4. يمكن من خلال طريقة CFD-DEM حساب التبادل الحراري بين الحبيبات فيما بينها من جهة ، وبين الحبيبات والجدران من جهة أخرى. ويبين الجدول (1) أهم الفروقات بين الاختصارات السابقة:

الجدول(1): الاختصارات الواردة في هذه الدراسة

Computational fluid Dynamics(CFD) ديناميك الموائع الحسابي	Discrete phase method(Dpm) طريقة الطور المنفصل	Discrete element method (DEM) طريقة العنصر المنفصل
يتم تطبيق معادلات Navier-stokes التقليدية على المائع المدروس	يتم تتبع مسار الحبيبات اعتماداً على القوى المؤثرة عليها مع إهمال القوى المتبادلة فيما بينها بينما يؤخذ التفاعل بين الحبيبات وجدار الأنبوب بعين الاعتبار.	يتم استخدام القوى المؤثرة على كل حبيبة للتنبؤ بالموقع والسرعة التاليين لها وتؤخذ التفاعلات بين الحبيبات بعين الاعتبار كقوى التصادم والاحتكاك.

## 2-1- نموذج طور الحبيبات (particle phase model) :

الحركة الانسحابية والدورانية للحبيبات : بطريقة DEM يتم تتبع مسار جميع الحبيبات وفقاً للمعادلتين:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_c + F_{f \rightarrow p} + m_p g \quad (1)$$

$$j_p \frac{dw_p}{dt} = M_c + M_{f \rightarrow p} \quad (2)$$

حيث:

- $m_p$ : كتلة الحبيبات
- $g$ : تسارع الجاذبية الأرضية
- $F_c$ : قوة التماس

- $w_p$  : السرعة الزاوية
- $J_p$  : عزم العطالة
- $M_c$  : العزم الصافي الناتج عن القوى المماسية المُسببة لدوران الحبيبات.
- $v_p$  : السرعة الخطية.

ويسبب التفاعل مع المائع يظهر مصطلحين إضافيين:

- $F_{f \rightarrow p}$  : القوة الإضافية الناتجة عن التفاعل مع الطور المائع
- $M_{f \rightarrow p}$  : العزم الإضافي الناتج عن تدرج سرعة الطور المائع [11]

## 2-2- نموذج طور المائع (Fluid phase model) :

لمعادلات Navier -  
حفظ الكتلة :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}) = 0 \quad \text{stockes التقليدية وتكون معادلة}$$

(3)

- $\alpha_f$  : معدل الانكسار (حجم تجزئة المائع).
- $\rho_f$  : كثافة المائع.
- $u$  : سرعة المائع. [11]

## 2-3- قوى التفاعل بين المائع والحبيبات:

تنقسم قوة التفاعل  $F_{f \rightarrow p}$  إلى قوتين أساسيتين:

- $F_D$  : قوة السحب
- $F_{N \rightarrow D}$  : قوى أخرى وتشمل :  
- قوة تدرج الضغط  $F_{\nabla p}$   
- قوة الكتلة الافتراضية  $F_{VM}$   
- قوة الرفع  $F_L$

ويتم التعبير عن القوى

السابقة بالعلاقة:

$$F_{f \rightarrow p} = F_D + F_{\nabla p} + F_L + F_{VM} + F_{others} \quad (4)$$

تبعاً لظروف التدفق غالبية القوى السابقة يمكن تجاهلها باستثناء قوة السحب وقوة تدرج الضغط وبالتالي تؤول المعادلة السابقة إلى الشكل:

$$F_{f \rightarrow p} = F_D + F_{\nabla p} \quad (5)$$

## 2-4 - حسابات التآكل الفيزيائي في الأنابيب (Erosion in pipe calculation) :

في طريقة dpm يُعطى مقدار التآكل الفيزيائي الناتج عن احتكاك الحبيبات بالأنبوب وفق معياري Oka و Generic بالعلاقة:

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^b(v)}{A_{face}} \quad (6)$$

حيث:

•  $C(dp)$  : تابع لقطر الحبيبة

•  $\alpha$  : زاوية الصدم بين الحبيبة والجدار

•  $f(\alpha)$  : تابع زاوية الصدم

•  $v$  : سرعة الحبيبة النسبية

•  $b(v)$  : تابع السرعة النسبية

•  $A_{face}$  : مساحة سطح الخلية

وتعتمد قيم  $c$  ,  $f$  ,  $b$  تجريبياً كالتالي:

$$[12] \quad c = 1,8 \times 10^{-9} \quad , \quad b=0 \quad , \quad f=1$$

### 3-1-1- توصيف الناقل المدروس:

يستخدم ناقل الحبوب البنيوماتيكي **VIGAN Mobile Type 200** باستطاعة  $(200\text{ton}/\text{hour})$  في مرفأ اللانقية ويعتمد على دارة هواء يغذيها ضاغط يعمل على محرك ديزل. تعمل هذه الآلية كقطعة واحدة وتركب على منصة خاصة على سطح السفن وتقوم بسحب الحبوب من عنابر السفن عن طريق أنابيب السحب وتقلها بتأثير الهواء إلى شاحنات التفريغ ويبلغ الطول الاعظمي لأنبوب السحب العمودي  $10\text{m}$  والطول الافقي  $8\text{m}$  وقطر الانبوب هو  $20\text{cm}$ .



الشكل (1) : الناقل البنيوماتيكي Vigan Mobile Type 200

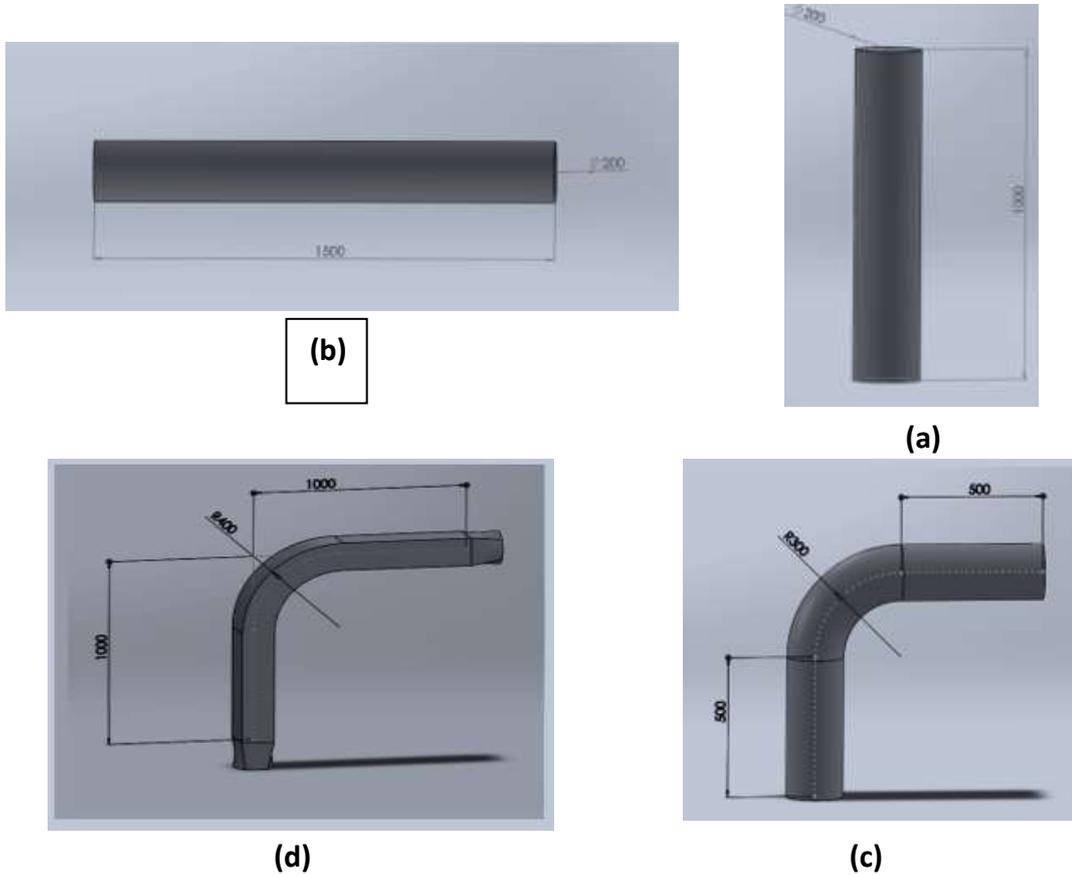
### 3-1-2- آلية عمل الناقل المدروس:

عند تشغيل المحرك ونقل الحركة إلى مضخة الهواء يسحب الهواء من أنبوب السحب مما يعني سحب المواد الموجودة في نهاية الأنبوب وينتجة التناقل تسقط المادة المنقولة ( الحبوب ) إلى الموزع ثم إلى القفل الهوائي يتم سحب الهواء من المرشح وبالتالي من مجمع الغبار وباعتباره يكون مغلقاً فسوف يتم سحب الهواء من المرشح.

ويضغط الهواء من الضاغط إلى مجمع الهواء الذي يحوي صمامات تحكم تفتح في حالة زيادة الضغط عن الحد المسموح به وينتقل الهواء المضغوط عبر أنبوب التفريغ مارا بمجمع الحبوب والهواء وينتقل المزيج ( هواء ، حبوب ) عبر أنبوب التفريغ إلى قمع خاص ثم إلى الشاحنات أو منطقة التفريغ

### 3-1-3- توصيف العناصر المدروسة:

تم دراسة سلوك التدفق لمادة القمح في بعض الأجزاء الأساسية للناقل مثل أنبوب السحب العمودي بطول 1m و في الانحناء ذو المقطع الدائري بزواوية 90° وأنبوب السحب الافقي بطول 1.5m عند أبعاد مختلفة للحبيبات mm (3.5,4) وتم اعتماد سرعات مختلفة للهواء بناء على الحساب التصميمي للناقل وهي (15,17.5)m/s ودراسة تأثير تغيير شكل مقطع الأنبوب في الجزء المنحني منه ومقارنة كل من سلوك التدفق والتآكل الفيزيائي بين الأنبوب ذو المقطع الدائري والأنبوب ذو المقطع المستطيل وتم تغيير شكل المقطع لأن بعض شركات تصنيع النواقل تعتمد الانحناء ذو المقطع المستطيل بهدف التقليل من قوى التصادم والاحتكاك وبالتالي تقليل التآكل الناتج.



الشكل (2): نماذج الأجزاء المدروسة باستخدام برنامج Solidworks

(a) القسم العمودي (b) القسم الأفقي (c) القسم المنحني ذو المقطع الدائري (d) القسم المنحني ذو المقطع المستطيل

## 3-1-4- بيانات حالة الدراسة:

## (1) بارمترات المواد:

الجدول (2) : البارمترات المُدخلة لكل من الحُبيبات والهواء

المائع Fluid	الهواء air	
	الكثافة density ( $kg/m^3$ )	اللزوجة viscosity ( $N.S/m^2$ )
	1,225	$1,78 e^{-5}$
الصلب solid	قمح wheat	
	Density ( $kg/m^3$ )	Viscosity
	750	0

يمكن حساب سرعة الهواء المطلوبة وفق العلاقة : [13]

$$c_1 = 1.2 c_{min}$$

حيث:

$c_{min}$  : السرعة الأصغر اللازمة للنقل وهي قيمة تجريبية تؤخذ للمواد حُبيبية ضمن المجال (16-13) m/s

$$c_1 = 1.2 \times 13 = 15.6 \text{ m/s}$$

## (2) خصائص الحُبيبية:

يوضح الجدول التالي البارمترات الخاصة بحُبيبات القمح ويهدف استخدام حُبيبات ذات شكل كروي إلى المقارنة بالنموذج القياسي لعمليات النمذجة كأن يتم مقارنة الحالة المدروسة (حُبيبات القمح) مع إحدى الحالات القياسية الافتراضية (حُبيبات كروية) والتي تملك أبعاد مشابهة للحالة المدروسة. [13]

الجدول (3) : أبعاد حُبيبات القمح وأبعاد الحُبيبية في حالة الحُبيبية الكروية

المادة material	الشكل shape	نسبة البعد الطولي Vertical aspect ratio	نسبة البعد العرضي Horizontal aspect ratio	عدد الزوايا No. of corners	الحجم Size
Wheat القمح	Sphero polygon	(1,95-2,05)	(0,85-0,9)	(5)	(3,5-4)mm
Sphere particle الحُبيبية الكروية	Spherical كروي	0	0	0	(3.5-4)mm

إضافة إلى دراسة التآكل الفيزيائي بطريقة DEM تم دراسته بطريقة الطور المنفصل عن طريق إدخال الحبيبات بشكل منفصل ومقارنة النتائج وفي نموذج DPM (Discrete phase model) يتم إدخال الحبيبات عن طريق مدخل الأنبوب دون اللجوء إلى برامج تعالج طور الحبيبات بشكل مستقل.

وتُعد هذه الطريقة فعالة في دراسة التآكل الفيزيائي حيث يؤخذ التفاعل بين الحبيبات والجدار بعين الاعتبار مع إهمال التفاعل بين الحبيبات فيما بينها. ويوضح الجدول التالي خصائص الإدخال وفق برنامج Ansys: [11]

الجدول (4) : بارمترات مدخل الحبيبات في طريقة Dpm في برنامج Ansys

Injection type نوع الإدخال	Surface (inlet) المدخل (سطح)			
Drag law قانون السحب	None spherical غير كروية			
Shape factor معامل الشكل	0,58			
Point properties خصائص نقطة الإدخال	Flow rate معدل التدفق الكتلي	Min diameter القطر الأصغري	Max diameter القطر الأعظمي	Mean diameter القطر الوسطي
	(0.278,0.55,0.415 7)kg/s	0,0035 m	0,005 m	0,004 m

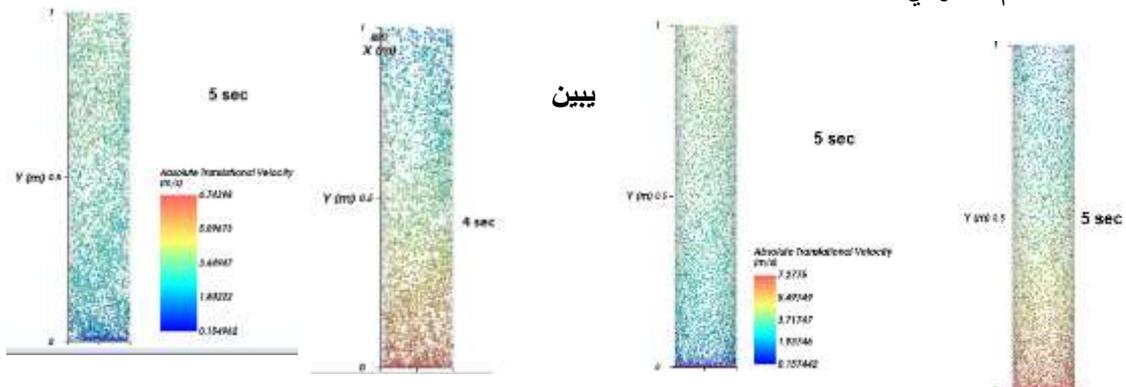
### 3) معايير عمل الدراسة:

تم إجراء 20 عملية نمذجة عند سرعات مختلفة للهواء وأبعاد عديدة للحبيبات وبناءً على نتائج هذه العمليات تم تحديد الشروط المثلى التي تحقق الكفاءة الأعلى عند أقل معدل تآكل وضياح ضغط ممكن.

### النتائج والمناقشة:

بعد نمذجة سلوك التدفق عند عدة سرعات أظهرت نتائج عمليات النمذجة أن السرعة المناسبة لعملية التدفق والتي تحقق الحالة المثلى هي 17.5 m/s والتي تعتبر أعلى من السرعة الحرجة التي تقدر ب 15 m/s وبناءً على ذلك يوضح كل من الشكلين (3) و(4) سلوك التدفق وقيم السرعات المطلقة للحبيبات عند حجم (3.5,4)mm.

#### 4-1- القسم العمودي:



الشكل (4) : تدفق وسرعة الحبيبات ذات القياس 4mm

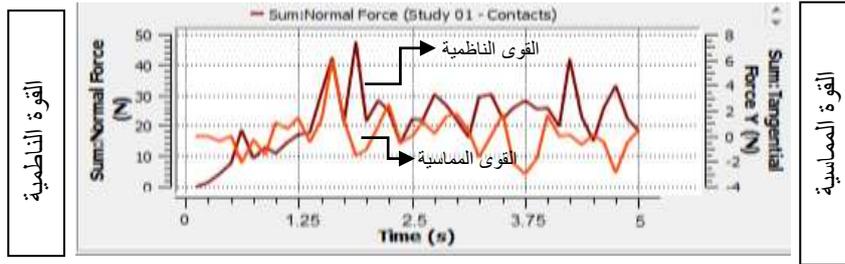
الشكل (3) : تدفق وسرعة الحبيبات ذات القياس 3.5mm

**الشكل (3)** أنه عند زيادة سرعة الهواء إلى  $17.5\text{m/s}$  يتغير سلوك التدفق بشكل ملحوظ ويصبح تدفق الحبيبات أكثر انسيابية وبدون حدوث تجمعات ويكون التركيز الأعظمي للحبيبات على جدران الأنبوب في بداية عملية النقل ليتزايد مع تقدم الزمن وتتوزع الحبيبات بشكل منتظم وصولاً إلى مركز الأنبوب، وعند بداية عملية النقل تكون سرعة انتقال الحبيبات عالية نسبياً بحوالي  $9.8\text{m/s}$  وتتنخفض بشكل تدريجي لتصل إلى حدود  $4\text{m/s}$  وتظهر الأشكال السابقة ثبات نظام النقل وتحقيقه لكفاءة عالية.

بينما يبين **الشكل (4)** أن الحبيبات تتدفق بشكل أسرع عند حجم  $4\text{mm}$  وزيادة سرعة الهواء إلى  $17.5\text{m/s}$  مع عدم ملاحظة اختناقات أو تجمعات على امتداد الأنبوب ويتضح استقرار سلوك التدفق في الثانية الخامسة وتزايد سرعة انتقال الحبيبات بشكل تدريجي عند بدء عملية النمذجة وتبلغ الحد الأعظمي عند الثانية الرابعة لتصل إلى حدود  $6\text{m/s}$  كما وتتوزع الحبيبات في منتصف وعلى جدران الأنبوب ويضمن ذلك انتقال المادة بشكل أفضل مما يوضح التأثير الأكبر للسرعة مقارنة بالحجم ضمن الحدود الأساسية.

#### 4-1-1- القوى الناظمية والمماسية:

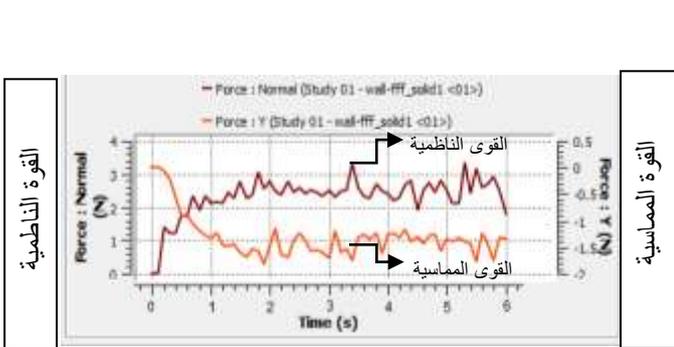
تم دراسة ومقارنة القوى الناتجة عن التأثير المتبادل للحبيبات فيما بينها وهي القوة الناظمية والمماسية والتي تنتج بسبب التصادم بين الحبيبات بفعل الحركة العشوائية عند بداية انتشارها.



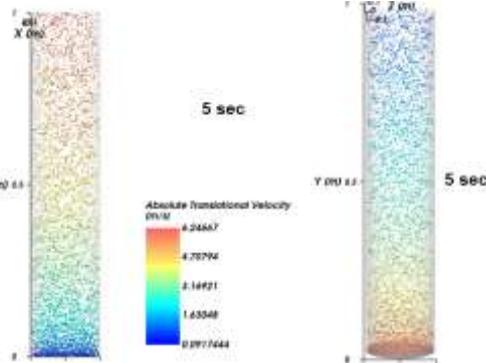
**الشكل (5) :** قيم القوى المماسية والناظمية في حالة قياس الحبيبات  $4\text{mm}$  باستخدام برنامج Rocky Dem

يبين **الشكل (5)** مخططات القوى الناظمية والمماسية الناتجة عن تفاعل الحبيبات فيما بينها ويلاحظ من المخططات التدرج الحاد في قيم كل من القوى المماسية والناظمية ويعود السبب في ذلك إلى الحجم المنخفض للحبيبة والسرعة المرتفعة نسبياً.

#### 4-1-2- التدفق والسرعة في حالة الحبيبات الكروية:



**الشكل (7) :** قيم القوى المماسية والناظمية في حالة قياس الحبيبات الكروية  $4\text{mm}$



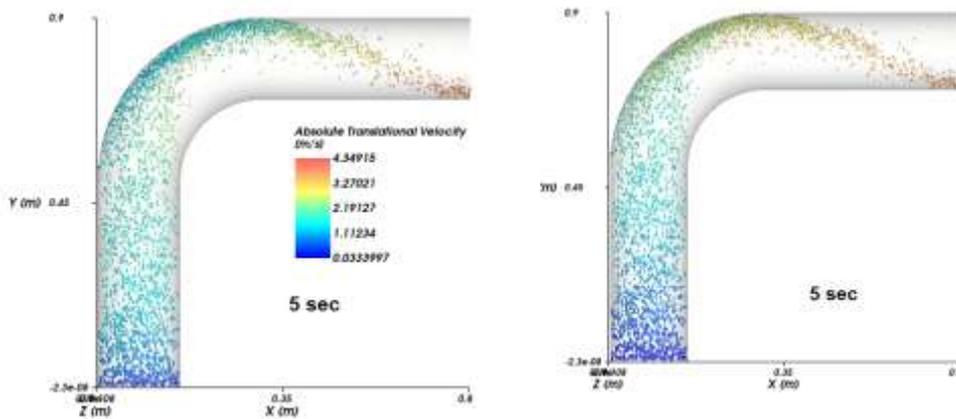
**الشكل (6) :** التدفق والسرعة في حالة الحبيبات الكروية عند قياس  $4\text{mm}$

إن تغيير شكل الحبيبات إلى الكروية (الحالة القياسية المقارنة) سيؤدي إلى انخفاض القوى المتبادلة فيما بينها وبالتالي تغيير سلوك التدفق بشكل واضح وتبين الأشكال السابقة تشكل تجمعات للحبيبات الكروية في بداية عملية النمذجة وانتقال التجمعات بشكل مستقر ويتضح شكل وكثافة التجمعات في الشكل (6) وهذا ما يفسر التوزع ذو الانتظام العالي في الأنبوب وامتلاءه بشكل شبه كامل بدءاً من الجدران حتى مركز الأنبوب.

#### 4-1-3- القوى المماسية والناظمية:

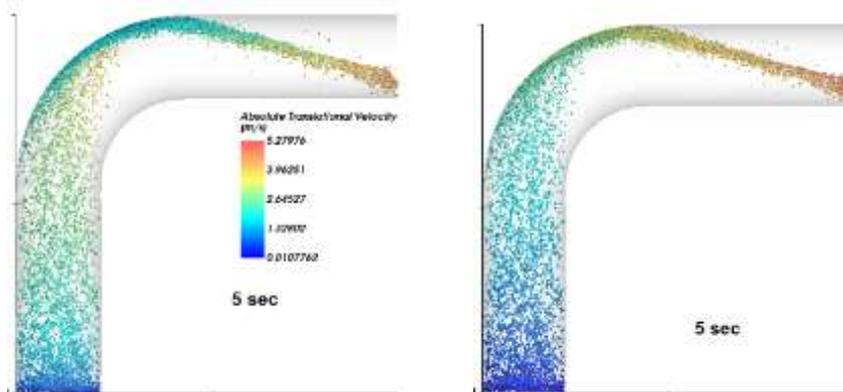
يبين الشكل (7) التأثير البالغ لشكل الحبيبات على القوى المتبادلة فيما بينها بحيث ينخفض مقدار هذه القوى عند استخدام الشكل الكروي ويعود السبب في ذلك إلى اختلاف مركبات القوى وسطوح التماس بين كل حبيبتين متجاورتين.

#### 4-2- القسم المنحني:



الشكل (8) : تدفق وسرعة الحبيبات ذات القياس 3.5mm

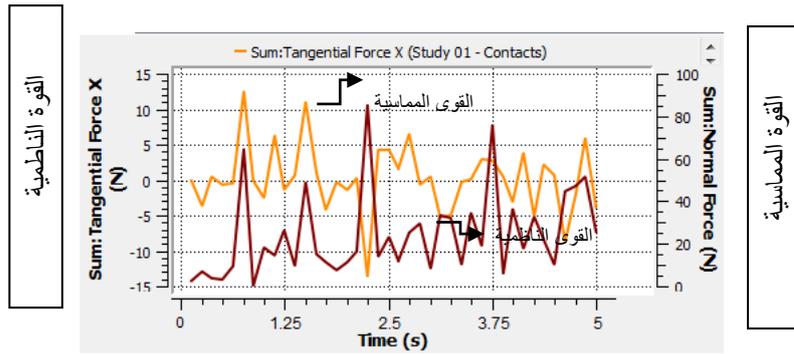
نلاحظ أن الحبيبات تنتشر في الجزء العمودي بشكل منتظم قبل وصولها إلى الزاوية العلوية للانحناء وتغيير اتجاه التدفق بشكل أكثر استقرار مع عدم وجود اختناقات في مركز الأنبوب أو على زوايا الانحناء ويعود ذلك إلى سرعة الهواء الملائمة لعملية النقل والتي تبلغ  $17.5\text{m/s}$ . ويظهر من الشكل (8) عدم وجود تشتت عالي لتوزع الحبيبات ويظهر من عملية النمذجة التدرج في قيم السرعة وذلك بسبب دخول الحبيبات إلى الانحناء واستقرار قيم السرعة الانتقالية بعد خروجها من الانحناء إلى القسم الأفقي من الأنبوب.



الشكل (9) : التدفق والسرعة في حالة الحبيبات عند قياس 4mm

يظهر الشكل (9) تأثير زيادة حجم الحبيبات الى 4mm عند سرعة هواء بمقدار 17.5m/s حيث تتدفق الحبيبات بشكل انسيابي في الجزء العمودي من الانحناء وتأخذ مساراً ثابتاً بفعل الثقل النوعي للحبيبات وقوى الجاذبية. ويلاحظ زيادة في كثافة التشتت ويعود السبب في ذلك الى دوران الحبيبات في مركز الأنبوب بعد الخروج من الانحناء ويمتلئ القسم العمودي من الأنبوب عند بداية عملية النقل وغالباً ما يترافق تدفق المادة في الأجزاء العمودية مع زيادة نسبية في الضغط الناتج عن جاذبية المادة وتبين الأشكال السابقة أن تدرج السرعة الانتقالية يبدأ من الثانية الأولى من النمذجة لتستقر السرعات في الثواني التالية عند قيم متشابهة وهو ما يدل على استقرار التدفق بشكل عام .

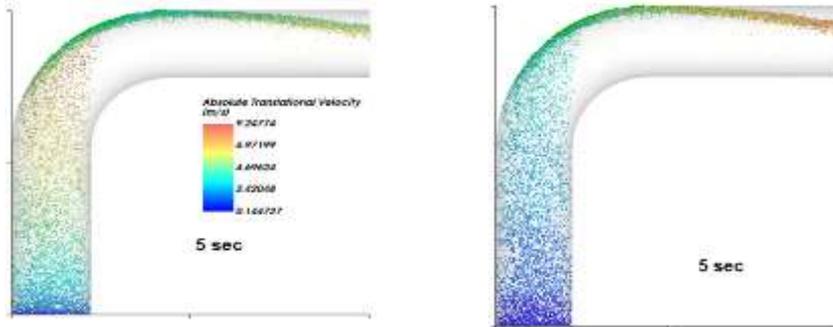
#### 4-2-1- القوى المماسية والناظمية :



الشكل (10) : قيم القوى المماسية والناظمية في حالة قياس الحبيبات 4mm

يظهر الشكل (10) مخططات القوى الناطمية والمماسية الخاصة بالحالة الثانية والتي تعود للانحناء ونلاحظ التزايد الواضح في قيم القوى بسبب صدم الحبيبات لزوية الانحناء ،وبالتالي تغيير مسار الانتشار، مما أدى إلى زيادة التأثيرات ،والتصادمات المتبادلة فيما بينها ،وبالتالي زيادة مقدار القوى.

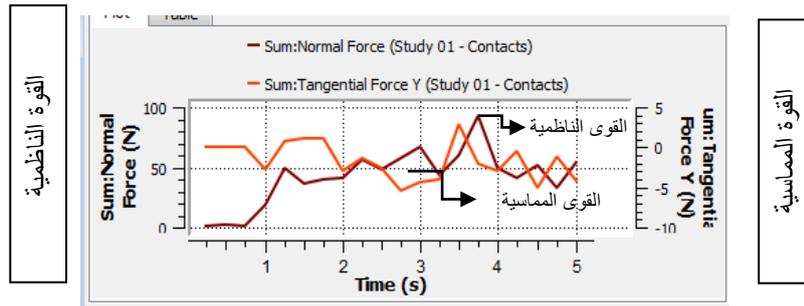
#### 4-2-2- في حالة الحبيبات الكروية :



الشكل (11) : التدفق والسرعة في حالة الحبيبات الكروية عند قياس 4mm

يوضح الشكل (11) تأثير تغير شكل الحبيبة إلى الشكل الكروي، ويتضح الانتقال الموجي لمجموعات حبيبية صغيرة في الجزء العمودي من الأنبوب وتتشكل تجمعات أكبر عند الانحناء ،وينخفض معدل التشتت للحبيبات بشكل واضح لتبقى الحبيبات بعدها أقرب إلى الجزء العلوي من الأنبوب في القسم الأفقي، ويعود السبب في ذلك إلى تغير كثافة الحبيبات الغبارية الذي يؤثر بدوره على تدفق التجمعات الذي يصبح غير مستقر.

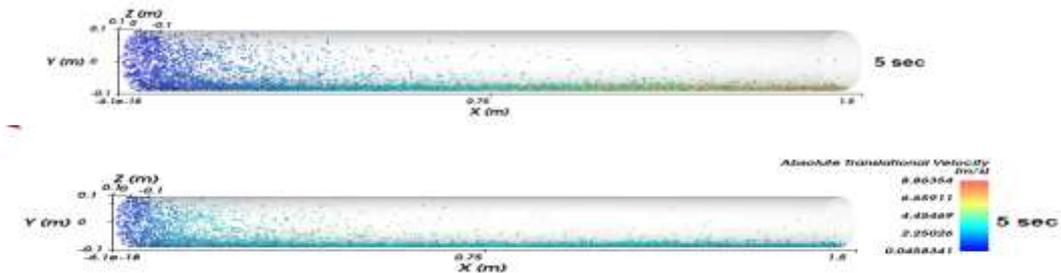
#### 4-2-3- القوى المماسية والناظمية:



الشكل (12) : قيم القوى المماسية والناظمية في حالة قياس الحبيبات الكروية 4mm

يبين الشكل (12) الانخفاض الملحوظ في قيم القوى المماسية بسبب الشكل الكروي للحبيبة، بينما تتدرج القوى النازمية لتصل إلى قيمها الأعظمية في منطقة الانحناء بسبب التغير المفاجئ في اتجاه التدفق، وبسبب الاصطدام بجدار الأنبوب، والذي بدوره يزيد من تصادم الحبيبات فيما بينها.

#### 4-3- القسم الافقي :



الشكل (13) : تدفق وسرعة الحبيبات ذات القياس 3.5mm

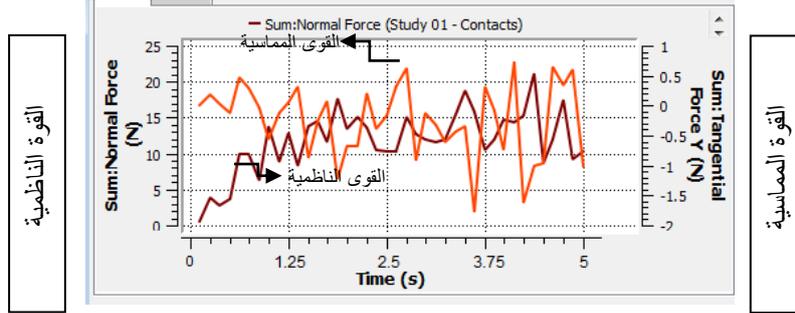
يختلف سلوك التدفق ليصبح أكثر انسيابية، ويلاحظ من الشكل (13) أن الحبيبات تبدأ بالانتشار بشكل تجمعات تتمركز في بداية الأنبوب، ثم تستقر عملية انتشار الحبيبات لتتوزع بشكل منتظم في القسم السفلي من الأنبوب، ويستمر التدفق بشكل كثباني، مع ملاحظة معدل توزع مستقر للحبيبات على امتداد الأنبوب كما في الثانية الخامسة من عملية المحاكاة على الرغم من ثبات السرعة الابتدائية للحبيبات، إلا أن تغير سرعة الهواء تؤثر بشكل واضح في سرعة تدفق الحبيبات، حيث يتضح من الأشكال السابقة أن الحبيبات ذات السرعات الأكبر تستمر في الجريان مبتعدة عن بداية الأنبوب، بينما الحبيبات الأقل سرعة تكون عند مدخل الأنبوب.



الشكل (14) : التدفق والسرعة في حالة الحبيبات عند قياس 4mm

عند زيادة حجم الحبيبات الى 4mm نلاحظ استقرار عملية توزع الحبيبات بعد بداية انتشارها ويصبح التدفق ذو سمة انسيابية مع التقدم في الزمن بدون ملاحظة تجمعات في منتصف الأنبوب ويعود الارتفاع النسبي للسرعة الانتقالية للحبيبات إلى زيادة حجم الحبيبات وبالتالي زيادة السرعة المستخدمة للهواء ونلاحظ من الشكل (14) أن السرعة الانتقالية للحبيبات تتأرجح بين حدود (10-20)m/s بحيث تنتقل الحبيبات ذات السرعة الأعلى منذ بداية الانتشار بشكل أساسي في الجزء العلوي من الأنبوب بدون تشكل تجمعات.

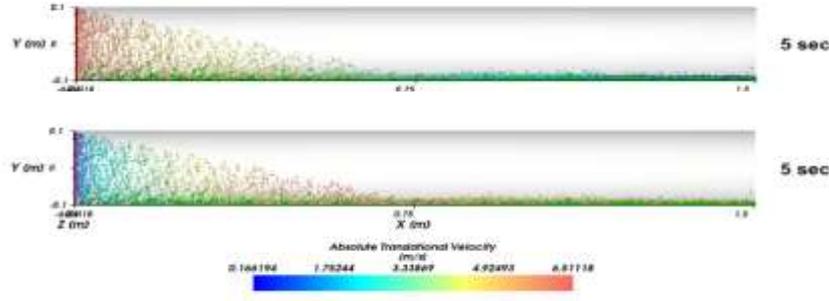
#### 4-3-1- القوى المماسية والناظمية :



الشكل (15) : قيم القوى المماسية والناظمية في حالة قياس الحبيبات 4mm

بعد دخول الحبيبات إلى القسم الأفقي، يستقر شكل التدفق على الرغم من وجود تشتت واضح في بداية عملية التدفق، وذلك بسبب السرعة الابتدائية عند خروجها من منطقة الانحناء، ونلاحظ انخفاض في مقدار القوى الناتجة بسبب السلوك الموجي للتدفق، والذي بدوره يقلل من السرعة الوسطية للحبيبات بعد استقرار عملية التدفق، كما يوضح الشكل (15).

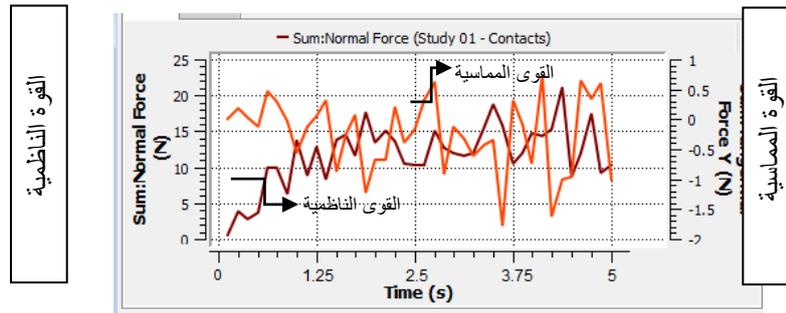
#### 4-3-2- في حالة الحبيبات الكروية:



الشكل (16) : التدفق والسرعة في حالة الحبيبات الكروية عند قياس 4mm

إن انخفاض القوى المتبادلة بين الحبيبات ذات الشكل الكروي يظهر تأثير الجاذبية بشكل أكثر وضوحاً في القسم الأفقي ويبين الشكل (16) التدفق الموجي للحبيبات الكروية بحيث تدور الحبيبات ذات السرعات الأعلى في منتصف الأنبوب وتتدفق الحبيبات ذات السرعات المنخفضة بشكل أكثر استقراراً.

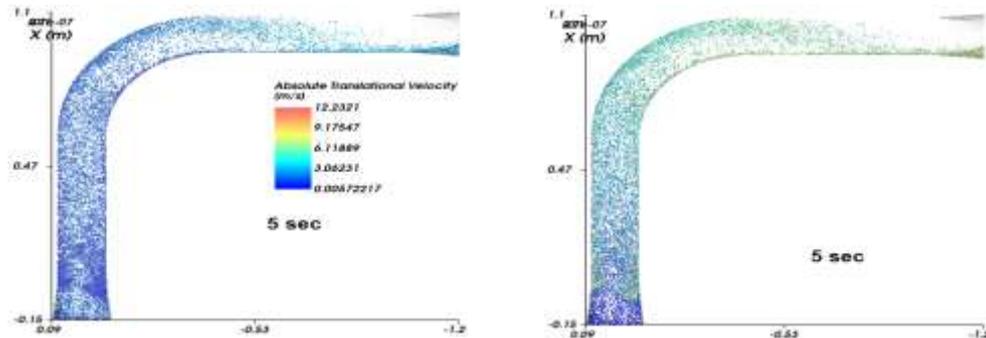
#### 4-3-3-القوى المماسية والناظمية :



الشكل (17) : قيم القوى المماسية والناظمية في حالة الحبيبات الكروية عند قياس 4mm

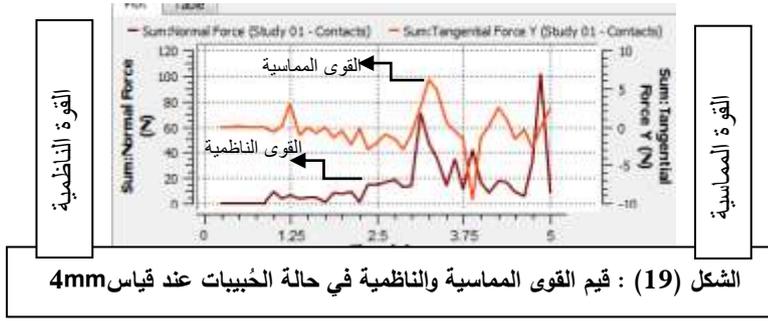
يبين الشكل (17) التأثير الكبير للجاذبية عند تدفق الحبيبات في القسم الأفقي حيث تنخفض قيم كل من القيم المماسية والناظمية وتتراوح بشكل وسطي بين 10N للقوى الناظمية و 0.5N للقوى المماسية.

#### 4-4- القسم المنحني ذو المقطع المستطيل:



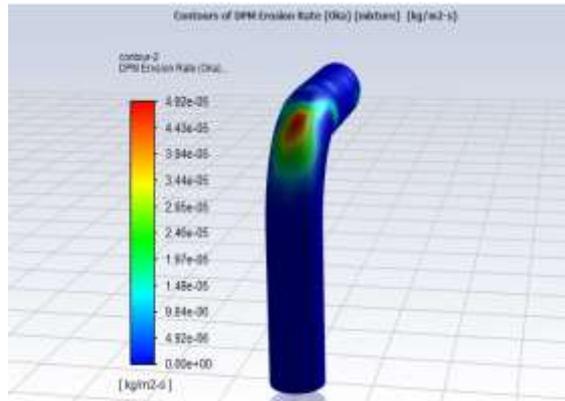
الشكل (18) : تدفق وسرعة الحبيبات ذات القياس 4mm

عند تغيير شكل مقطع الأنبوب في منطقة الانحناء الى مستطيل لوحظ اختلاف كبير في سلوك تدفق الحبيبات وبشكل أقرب إلى الحالة الواقعية للتدفق بسبب التأثير البالغ لشكل مقطع الأنبوب ويشير الشكل (18) إلى معدل الانتشار المعتدل للحبيبات عند بداية النمذجة والحفاظ على توزيع شبه منتظم عند الدخول إلى منطقة الانحناء والخروج منها حيث تكون سرعة دخول الحبيبات في بداية عملية النمذجة منخفضة نسبياً بينما تتزايد عند الخروج من الانحناء والدخول في القسم الأفقي من الأنبوب وتتجمع الحبيبات ذات السرعات الأعلى والتي تبلغ حوالي 11m/s في منتصف الأنبوب بينما تدور الحبيبات ذات السرعات المتوسطة والتي تصل سرعتها إلى حدود 8m/s في بداية القسم الأفقي ونلاحظ من الشكل (18) أن الحبيبات بدأت بالانتشار في منطقة الانحناء قبل امتلاء القسم العمودي بشكل كامل ويعتبر ذلك أحد أهم العوامل الإيجابية في سلوك التدفق مما يمنع حدوث الاختناقات والتجمعات أو تكديس الحبيبات في الأنبوب العمودي وبنظام النقل ككل.

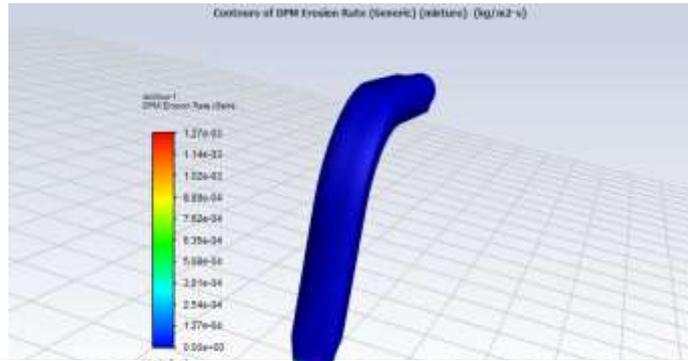


عند استبدال شكل المقطع إلى مستطيل نلاحظ انخفاض كبير في مقدار القوى في كل من القسمين الأفقي والعمودي من الانحناء ولوحظ بداية الارتفاع التدريجي للقوى المماسية والناعمية عند الاصطدام بزواوية الانحناء وبشكل مشابه لحالة الانحناء ذو المقطع الدائري مع ملاحظة قيم أصغر للقوى عند استخدام المقطع المستطيل ويعود السبب في ذلك إلى الاصطدام الغير حاد بين الحبيبات فيما بينها وبين الحبيبات والجدار على خلاف المقطع الدائري ذو التدرج الحاد في منطقة الانحناء كما يبين الشكل (19).

#### 4-5 - نتائج دراسة التآكل في الانحناء بطريقة (DPM) Discrete elements method:



لوحظ من النتائج السابقة أن السرعة الأفضل للتدفق هي 17.5m/s وتمت دراسة التآكل الناتج عن تدفق حبيبات القمح عند هذه السرعة ودراسة تأثير تغيير شكل مقطع الأنبوب ويوضح الشكل (20) مقدار وموقع التآكل الناتج في الأنبوب ذو المقطع الدائري ويتبين تركيز التآكل عند الانحناء بشكل واضح وعلى الرغم من أن مقدار التآكل يظهر بقيم منخفضة إلا أن ذلك يعتبر مؤشر غير جيد للعمر الافتراضي لاهتلاك الأنبوب ويفسر حدوث التآكل في هذا الموقع بسبب التغير المفاجئ في انخفاض الضغط والذي بدوره يؤدي إلى زيادة كل من سرعة وقوة الصدم عند ارتطام الحبيبات بجدران الأنبوب الدائري عند دخولها منطقة الانحناء وخروجها منها.



الشكل (21) : قيم التآكل الناتجة في الانحناء ذو المقطع المستطيل عند قياسات 3.5 , 4 , 5 mm

ولكن عند تغيير شكل المقطع إلى المستطيل في محاولة للتقليل من مقدار التآكل لوحظ الانخفاض الكبير لمقدار التآكل في منطقة الانحناء إلى قيم شبه معدومة كما يوضح الشكل (21) واقتصر التآكل في منطقة حقن الحبيبات بسبب الكثافة العالية لتجمعات حبيبات القمح مما يبين أهمية تغيير شكل المقطع وتفضيل استخدام الأنبوب ذو المقطع المستطيل لاسيما في منطقة الانحناء حيث ينتظم كل من توزع الحبيبات وقوى التماس فيه.

### الاستنتاجات والتوصيات:

#### الاستنتاجات:

- بعد جمع بيانات 20 عملية نمذجة لحبيبات القمح المنقولة وتطبيق طريقة DEM-CFD لدراسة سلوك التدفق وطريقة DPM لدراسة التآكل في الانحناء تم التوصل إلى النتائج التالية:
1. أظهرت طريقة DEM-CFD فعالية عالية في دراسة سلوك التدفق في ظروف الناقل البنيوماتيكي المدروس.
  2. تأثير أبعاد الحبيبات المنقولة عند السرعات المحددة بحيث تحققت الحالة المثلى للتدفق عند طول 4mm لحبيبة القمح عند السرعة 17.5 m/s للهواء.
  3. فعالية طريقة DPM بالتنبؤ بمقدار التآكل الناتج في الانحناء.
  4. إن اقتراب شكل الحبيبات المنقولة من الشكل الكروي (الحالة القياسية) يساهم في الحصول على تدفق أكثر انسيابية وقيم أقل للقوى المتبادلة.
  5. إن استخدام الأنبوب ذو المقطع المستطيل بدلاً عن المقطع الدائري ساهم بشكل ملحوظ بانخفاض مقدار التآكل الناتج في الانحناء والحصول على سلوك أفضل للتدفق.
  6. عند بارامترات محددة يُحافظ التدفق على شكل كثباني في القسم الأفقي بحيث تدفق الحبيبات بشكل تجمعات على عكس القسم العمودي الذي لم يلاحظ فيه وجود أي تجمعات بعد استقرار عملية التدفق.

#### التوصيات:

1. دراسة سلوك التدفق ضمن الناقل باستخدام مواد مختلفة كالذرة أو فول الصويا.
2. دراسة إمكانية استخدام الناقل في أماكن أخرى كالمصانع التي تختلف بارامترات النقل فيها عن المرفأ.
3. دراسة العوامل المختلفة المؤثرة على تآكل الأنابيب كزيادة نسبة الرطوبة والحرارة في المنطقة المدروسة.
4. دراسة إمكانية تطبيق طريقة DEM-CFD على النواقل البنيوماتيكية الصغيرة ذات التدفق الكتلي المنخفض.

**References:**

- 1- J. Du, G. M. Hu, Simulation of dilute pneumatic conveying with different types of bends by CFD-DEM, Earth and Environmental Science 22 (2014) 052004
- 2- Shanshan. Sun, Zhulin.Yuan, Simulation of Solid Flow Behavior in Dense Phase Pneumatic Conveying with a Bend by a New Model, International Proceedings of Chemical, Vol. 90 (2015)
- 3- Zhihua Lia, Guangpeng Liu, Study on the Motion state of Powdery materials in Dense-phase Pneumatic Conveying Pipe , MATEC Web of Conferences 65: 03005(2016)
- 4- James. E. HILTON, Paul. W. CLEARY, THE ROLE OF PARTICLE SHAPE IN PNEUMATIC CONVEYING, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 3169(2009)
- 5-Mikio Sakai, SeiichiKoshizuka, Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying, Chemical Engineering Science, 64 (2009) 533 - 539
- 6- Martin Strauß · Sean McNamara Plug Conveying in a Horizontal Tube, German Research Community, HE 2732/2-3(2014).
- 7- Martin Strauß. a, Sean McNamara a, Hans J. Herrmann, Plug Conveying in a Vertical Tube, Powder Technology 162 (2016) 16 – 26
- 8-clarissa. B. fonte, joao.A. Oliver, DEM-CFD coupling: mathematical modelling and case studies using Rocky –DEM and Ansys fluent, Eleventh international Conference on CFD in the Minerals and Process Industries,52,2785-2809 (2015)
- 9-T. Deng, M Patel, Effect of bend orientation on life and puncture point location due to solid particle erosion of a high concentration flow in pneumatic conveyors, The Wolfson Centre for Bulk Solids Handling Technology, Wear 258 (2015) 426–433
- 10- David .J.Mason,Avi.Levy, The influence of bends on the performance of pneumatic Conveying systems, Advanced Powder Technology Volume 9 (2019) 197-206
- 11-Ansys CFX, release (2019) R3, help system, theory guide, Ansys, inch.
- 12-Drew,D ,mathematical modelling of two- phase flow, Annual Review of fluid mechanics,15:261-291(2006).
- 13- Latifahh al-Hamwi, Transportation Tools (Principles and Basics), Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, 2012.