مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨) العدد(٢) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (2) 2024

دراسة الجريان ثنائي الطور لسائل خفيف فوق سائل كثيف في حوض ساكن (التيار الثقالي)

د. م. احمد محمد الأحمد *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/٦/١٩ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٤/٢/٢٢)

□ ملخّص□

تتناول هذه الدراسة انتشار التيار الثقالي النيوتوني (الماء العذب) بكثافة ρ ، والسرعة الأولية U والارتفاع h على السطح الحر لسائل محيط (ماء مالح) ذو كثافة $\rho+\Delta\rho$ في حوض بحالة السكون. تمت هذه الدراسة في جملة ثلاثية الأبعاد (x, y, z). بمساعدة تقنية المخططات الزمانية المكانية DST، قمنا بقياس التطور الزمني للتقدم x، والانتشار العرضي y و عمق طبقة المزج z للسائل الخفيف في سائل أكثر كثافة. اتسمت هذه الدراسة باستنتاج مجموعة علاقات تجريبية لتأثير كثافة السائل المحيط على تطورات الجريان مع الإتجاهات المشار لها أعلاه و ذلك باستخدام تقنية DST (Diagramme Spatio Temporel)

كلمات مفتاحية: جريان ثنائي الطور، التيار الثقالي، مخطط التبع الزماني المكاني

مدرس في قسم هندسة المعدات والآليات_ كلية الهندسة التقنية –_ جامعة طرطوس

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨) العدد(٢) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (2) 2024

Study of the diphasic flow of a light liquid over a dense liquid in a stationary basin (Gravity current)

Dr Ahmad M Ahmad *
University of Tortuous

(Received ١٩/٦/2023 . Accepted ٢٢/٢/2024)

□ ABSTRACT □

This study considers the propagation of a gravity current of Newtonian (fresh water) with density □, initial speed U and height h upon the free surface of an ambient liquid (salty water) density □□□□□ at rest in a basin. This study is performed in three dimensional configurations. With the help of the spatiotemporal diagrams technique, we measured the temporal evolution of the progress x, the spreading y and the layer mixing z of the light liquid into denser liquid. These evolutions have been characterized by scaling laws.

Key words: biphasic flow, gravity current, spatiotemporal diagram

College of Technical Engineering Department of Equipment and Machinery Engineering

مقدمة

التيار الثقالي هو تدفق مائع معين داخل مائع آخر بكثافة مختلفة [١] *Simpson* . غالبًا ما تحدث التيارات الثقالية في تكوينات طبيعية المنشأ مثل تدفقات مصبات الأنهار، وتصريف مياه الصرف الصناعي في الأنهار أو البحار، وانتشار عمود من الدخان من مدخنة في الغلاف الجوي، إلخ [٢] *Huppert* . يمكن إنشاء تيارات الثقالية من خلال التدرج في درجة الحرارة أو تباين الملوحة أو عن طريق المواد المعلقة. تتمثل إحدى الخصائص الفيزيائية الرئيسية المطلوبة في دراسة التيار الثقالي في تحديد التدفق المنتشر وطبقة الخلط (المزج) في مقدمة التيار الثقالي.

مشكلة البحث

هذه الدراسة تعتبر محاكاة لظاهرة البقع النفطية و التي تتشكل نتيجة تسرب النفط من نواقل النفط أو النفط المتسرب من الخزانات القريبة من شواطئ البحار، و التي تبدأ بالإنتشار و التطور (التوسع) في جميع الإتجاهات (الطولية و العرضية و بالعمق شاقوليا). إن دراسة هذا التطور للجريان يعتبر الخطوة الأساسية في عملية تطويق البقعة النفطية و منع انتشارها و من ثم معالجتها و تنظيفها، هذه الظاهرة تدعى (*gravity current*) التيار الثقالي

هدف البحث

هدف هذه الدراسة هو تطبيق تقنية (*spatio-temporel*) التتبع الزماني و المكاني بواسطة التصوير المتلاحق و تحليل هذه الصور لاستنتاج بعض العلاقات التجريبية لتطور جريان التيار الثقالي من خلال رسم مخطط التطور و من ثم إمكانية دراسة تأثير خواص الجريان مثل اللزوجة و التدفق و التركيز الملحي، و سنقوم في هذا البحث بدراسة تأثير التركيز الملحي بتلك التقنية و استنتاج العلاقات التجريبية التي تبين تأثير التركيز على توسع و تطور التيار الثقالي.

دراسات مرجعية

أول حساب نظري لتيارات الجاذبية قام به Benjamin [3]. لقد أظهر أن تيار الجاذبية بكثافة ρ_2 المرتبط بطبقة خلط h تنتشر في سائل منخفض الكثافة ($\rho_2>\rho_1$) ρ_1 لها سرعة ثابتة $c= (2g'h)^{0.5}$ حيث $g'=g(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$ تمثل الجاذبية المخفضة. أظهر Benjamin لاحقًا أن هذا الحل جزئي لمشاكل التيارات الثقالية. استخدم هذا المؤلف مفهومًا عامًا للتيارات الثقالية بناءً على معادلات برنولي ومعادلات الاستمرار. وهكذا كان قادرًا على وصف التيار الثقالي المتولد بين سائلين مثاليين غير قابلين للامتزاج، حيث وصف فيها إزاحة سائل كثيف من خلال تقدمه تحت السائل الخفيف. أظهرت حسابات Benjamin أن رقم *Froude* و هو النسبة بين الطاقة الكامنة والطاقة الحركية يساوي $Fr=2^{0,5}$ عند التوازن. مع الأخذ بعين الاعتبار اختلاف الكثافة بين التيار الثقالي والسائل المحيط وجد *Benjamin* أن رقم فرود يساوي. $Fr=2^{0,5}(1-g'/32)$. أجرى *Fay* [٤] دراسة لتدفق التيارات الثقالية للزيت على الماء وأظهر أن قوة الطفو متوازنة في ***طور الجريان الأول*** بقوة العطالة. و اعتبر أن هاتين القوتين من الممكن أن تعطي علاقات الانتشار للتيار الثقالي لكمية ثابتة Q والتي تم اعتبارها في البداية كتابع $R\sim (g'Q)^{1/4}t^{1/2}$، حيث R الانتشار وحيد البعد للتيار الثقالي. و في **الطور**

الثاني للجريان اعتبر أن التوازن بين قوة الطفو وقوة اللزوجة ، والتي تتوافق مع $R\sim(g'Q^2\nu^{1/2})^{1/6}t^{1/4}$ تمثل ν اللزوجة الحركية . وفي **الطور الثالث** اعتبر [٤] Fay أن التوازن بين قوى الطفو وقوى التوتر السطحي محقق.

وقد درس [5] Hoult مشكلة جريان الزيت على الماء ووجد أنه بالنسبة لطور قوة العطالة فإن $R=1,3(g'Q)^{1/4}t^{1/2}$ لانتشار التيار وحيد البعد و $L=1,6(g'q)^{1/3}t$ للانتشار ثنائي البعد. في هذه العلاقة، تمثل q معدل التدفق السطحي للتيار الثقالي. وجد أنه في طور الجريان اللزج $R=0,94(g'^2Q^4/\nu)^{-1/12}t^{1/4}$ من أجل جريان وحيد البعد و للانتشار ثنائي البعد $L=1,5(g'^2q^4/\nu)^{1/8}t^{3/8}$. قام [6] Didden بدراسة تقدم التيار الثقالي معتمدا على توازن قوى العطالة و الجاذبية في طور العطالة، أما في طور الجريان اللزج فاعتمد على توازن قوى الجاذبية و قوى اللزوجة. و قد وجد أن علاقة انتشار الجريان في طور العطالة $L\sim(g'Q)^{1/3}t$ لجريان ثنائي البعد و من أجل جريان وحيد البعد $R\sim(g'Q)^{1/4}t^{3/4}$. أما في الطور اللزج و من أجل جريان ثنائي البعد فإن العلاقة هي $L\sim(g'Q^2/\nu^{1/2})^{1/4}t^{7/8}$ و للجريان وحيد البعد تؤول العلاقة إلى $R\sim(g'Q^2/\nu^{1/2})^{1/6}t^{7/12}$. و قد وجد أن عمق المزج وفق الإتجاه z يتبع العلاقة $L\sim(g'Q^3/\nu)^{1/5}t^{4/5}$.

درس [2] Huppert جريان سائل كثيف في سائل خفيف على سطح صلب حيث كان السائل المحيط ساكنا و لزجا. وقد وجد Huppert أن للجريان ثلاثة أطوار: ١) طور الغطس ٢) طور العطالة ٣) طور اللزوجة.

اقترح [7] Fannelop انطلاقا من معادلات نافيير–ستوكس ***Navier–Stokes***، أربعة أطوار لانتشار بقعة زيت على الماء الطور الأول: طور الغطس(المزج) حيث ($L \sim t$) أما الطور الثاني: طور التوازن بين قوى العطالة و قوى الثقالة حيث ($L \sim t^{2/3}$)، و الطور الثالث: التوازن بين قوى اللزوجة وقوى الجاذبية حيث ($L \sim t^{1/4}$) والطور الرابع: التوازن بين قوى اللزوجة وقوى التوتر السطحي و كانت العلاقة ($L \sim t^{3/4}$).

و قد قام [8] F.D.Vinna بدراسة تأثير درجة الحرارة و الكثافة على سرعة التيار الثقالي و قدم محاكاة رقمية عددية للتحقق من صحة تجاربه حيث تم توظيف تقنية رؤية الكمبيوتر في تتبع البارامترات و تأثيرها على مقدمة التيار.

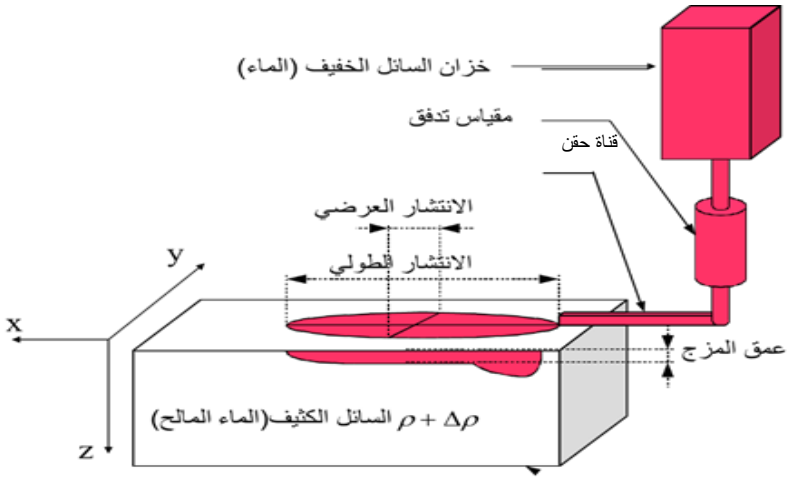
أما [9] E.P.Francisco فقد قدم دراسة للتيار الثقالي المحمل بجزيئات عالية الدقة عبر محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد حيث تم التركيز على تيارات الثقالة المسطحة و بفروق كثافة صغيرة.

اهتمت معظم الدراسات التي أجريت على التيارات الثقالية بالتكوينات ثنائية الأبعاد حيث كان السائل الأكثر كثافة هو الذي يتم دفعه ضمن السائل الخفيف.

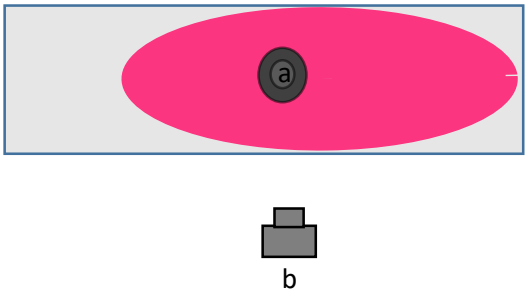
في هذا العمل ، سندرس تطور الجريان لتيار ثقالي لسائل نيوتوني (الماء العذب) على السطح الحر لسائل محيط قابل للامتزاج (ماء مالح) في حالة السكون وسنوجد علاقات التطور الزمني لهذا الانتشار على السطح و كذلك سماكة الطبقة المختلطة الغاطسة باستخدام تحليل الصور باستخدام برنامج ***Matlab*** و استنتاج العلاقات الزمنية لتطور الجريان على السطح مع البعدين (x,y) و كذلك عمق طبقة المزج مع البعد (z) و تأثر هذه العلاقات برقم ***Re*** و ***Fr*** و بكثافة السائل المحيط.

التجهيزات و تقنيات القياس

الشكل (١) يبين الحوض المستخدم في دراسة تطور الجريان للتيار الثقالي حيث يحتوي على السائل المحيط (الماء المالح) و هو مصنوع من مادة البلكسي الشفافة و أبعاده *300 cm*، *50 cm*، و ارتفاع *50 cm* و قد ثبت خزان آخر على ارتفاع *1.5m* بسعة *20 liters* يحوي ماء عذب يمثل السائل الخفيف و قد أضيف له صبغة ملونة ليتمم تتبع الجريان بواسطة كميرتين، واحدة مثبتة من الأعلى و الأخرى مثبتة مقابل الحوض كما هو موضح بالشكل (٢)



الشكل (١): حوض السائل الكثيف (الماء المالح) وحوض الماء العذب الملون



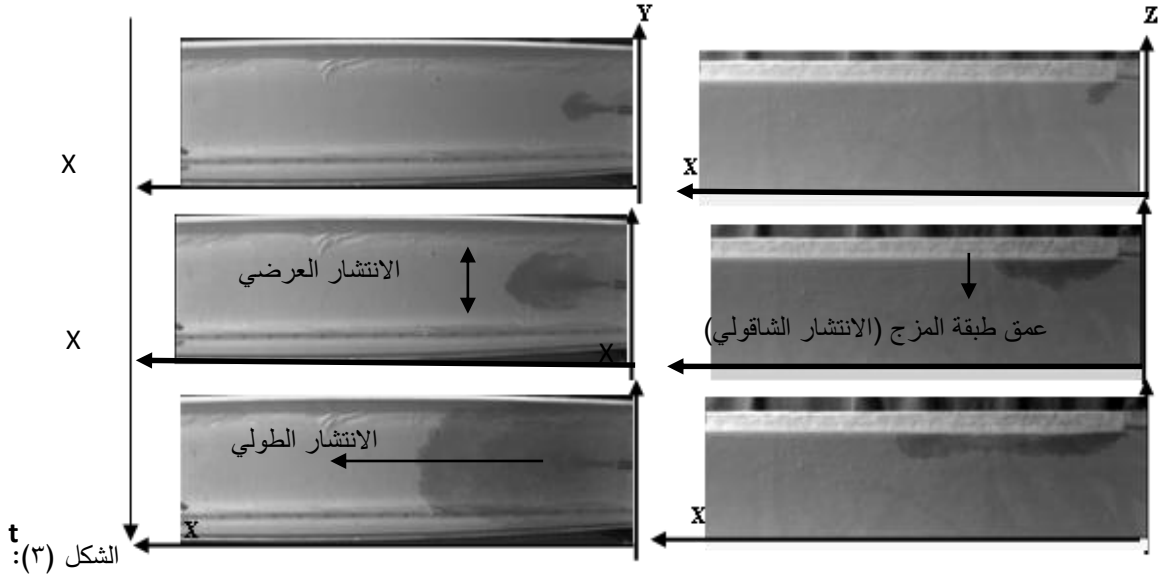
الشكل (٢): تموضع الكاميرات من الأعلى *a* و من الجانب *b*

يتم التحكم في التدفق بواسطة مقياس تدفق عادي ويتم حقن التيار في الحوض التجريبي عن طريق قناة الحقن. القناة مصنوعة من الزجاج الشفاف. طول القناة ٦٠٠ مم وعرضها ١٧ مم و هي بمستوي السطح الحر للماء المالح و كاميرات المراقبة تسمح بتتبع تطور الجريان في الإتجاهات (*x,y,z*)

النتائج و المناقشة

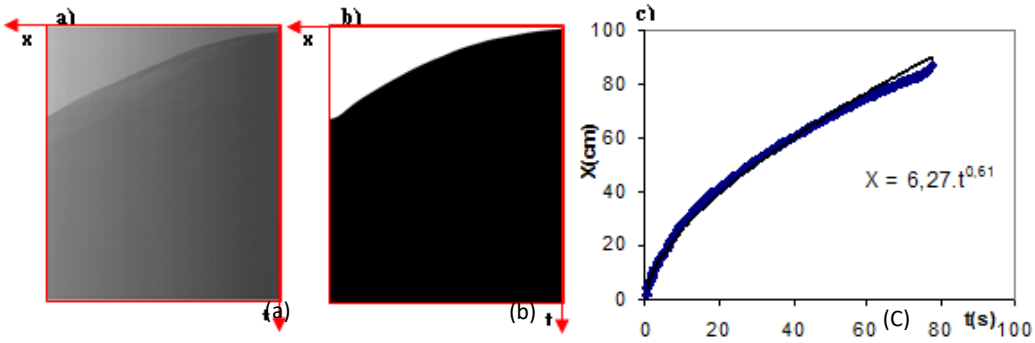
قوانين تقدم وانتشار التيار الثقالي وفق الإتجاهات الثلاث:

إن السائل الخفيف المستخدم في تجاربنا هو مياه عذبة ذو كثافة ρ مع صبغة تجعل من الممكن متابعة تطورها الزماني المكاني بواسطة الصور. و السائل المحيط هو الماء المالح بكثافة $\rho+\Delta\rho$ قابلة للتعديل من خلال التركيز. يظهر تقدم وانتشار التيار الثقالي في الشكل (٣,*a*) في المستوى (*x,y*) و يظهر تطور سماكة طبقة المزج في الشكل (٣,*b*) في المستوى (*x,z*).و من أجل الحصول على قوانين انتشار التيار الثقالي تلقائيًا في الاتجاهات الثلاثة ، قمنا بتطوير تقنية التتبع الزماني و المكاني باستخدام الصور المسجلة بواسطة الكاميرات. لقد تم اختيار موضع التتبع المكاني لتطور جريان التيار الثقالي عند محور قناة الحقن على طول اتجاه *x* في موضع ثابت بعد ذلك ، من خلال تراكب هذه الخطوط بمرور الوقت، قمنا ببناء مخطط الزماني المكاني الشكل (*4,a*) بواسطة تتبع الصور على *Matlab* الذي يبين انتشار الجبهة كعلاقة مع الزمن. ومن أجل استخدام هذا المخطط ليتمكن البرنامج من قراءته بشكل رقمي قمنا بعملية تباين لهذا المخطط للحصول عليه باللون الأبيض والأسود، الشكل *(4,b)*. و بنقل هذه البيانات الرقمية إلى برنامج *Excel* تم رسم التابع الزمني لانتشار التيار كما هو واضح بالشكل *(4,c)*.



الشكل (٣):

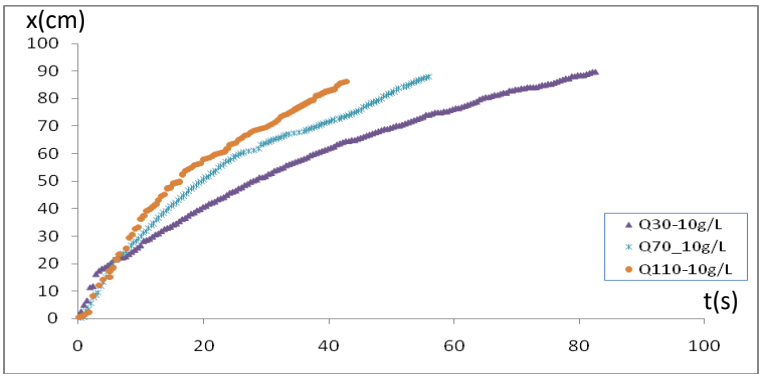
تطور الجريان وفق الإتجاهات الثلاث (x,y,z)



الشكل (٤): استنتاج علاقة انتشار التيار الثقالي مع الزمن باستخدام تقنية المخطط المكاني الزماني

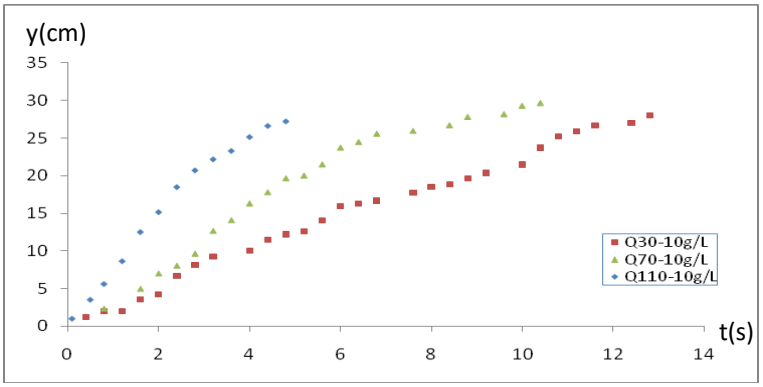
أجريت التجارب لثلاثة تراكيز مختلفة من الماء المالح (10, 20, 40 g/l)، ولكل تركيز، فرضنا ثلاثة معدلات تدفق، (30, 70, 110 l/h). تم تحديد رقم رينولدز: $Re = h.u/\nu$ ورقم فرود: $Fr=u/(g.h)^{0,5}$.

الشكل(٥) يبين التوابع الزمنية لانتشار التيار الثقالي من أجل ثلاث قيم للتدفقات و من أجل تركيز 10 g/l للسائل المحيط.



الشكل (٥): العلاقة الزمنية لتطور الجريان وفق الاتجاه (x) من أجل تركيز(10 g/l)

الشكل (٦) يبين انتشار التيار الثقالي بالإتجاه (y) من أجل تركز 10 g/l للسائل المحيط. و قد تم تجميع النتائج بالجدول (1).



الشكل (٦): العلاقة الزمنية لتطور الجريان وفق الإتجاه (y) من أجل تركيز (10 g/l)

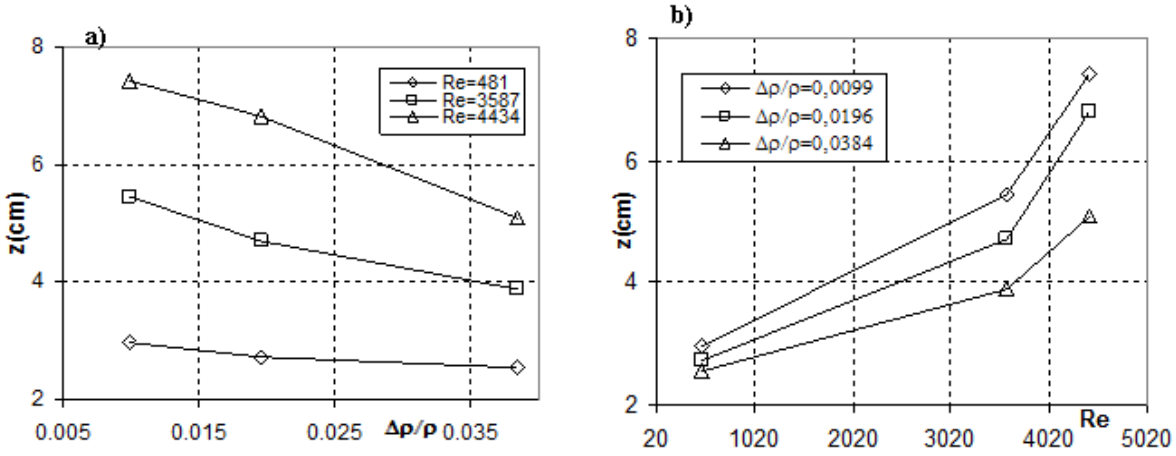
Q(L/h)	$\Delta\rho/\rho$ (10g/L sel)	Re $h.u/\nu$	Fr $u/\sqrt{g.h}$	الانتشار مع (x)	الانتشار مع (y)
30	0.0099	481	0.69	$x=4.16t+0.572$ $x=12.6t^{0.535}$	$y=5.768t^{0.642}$
70	0.0099	3587	0.97	$x=3.53t+6.38$ $x=12.86t^{0.502}$	$y=5.928t^{0.65}$
110	0.0099	4434	1.149	$x=3.2t-0.76$ $x=4.2t^{0.76}$	$y=6.1t^{0.727}$
Q(L/h)	$\Delta\rho/\rho$ (20g/L sel)	**Re** $h.u/\nu$	**Fr** $u/\sqrt{g.h}$	الانتشار مع (x)	الانتشار مع (y)
30	0.0196	481	0.69	$x=2.2t+8.7$ $x=7.45t^{0.56}$	$y=6.87t^{0.641}$
70	0.0196	3587	0.97	$x=3.69t+8.5$ $x=12.26t^{0.557}$	$y=7.919t^{0.6107}$
110	0.0196	4434	1.149	$x=3.17t+3.88$ $x=6.6t^{0.72}$	$y=7.317t^{0.7209}$
Q(L/h)	$\Delta\rho/\rho$ (40g/L sel)	**Re** $h.u/\nu$	**Fr** $u/\sqrt{g.h}$	الانتشار مع (x)	الانتشار مع (y)
30	0.0384	481	0.69	$x=2.2t+8.59$ $x=8.3t^{0.54}$	$y=7.196t^{0.665}$
70	0.0384	3587	0.97	$x=3.15t+4.3$ $x=9.6t^{0.545}$	$y=7.34t^{0.6624}$
110	0.0384	4434	1.149	$x=3.8t+1.326$ $x=6.66t^{0.73}$	$y=7.9t^{0.7216}$

الجدول (١): نتائج قوانين الانتشار من أجل مختلف التراكيز و التدفقات

تحليل النتائج يبين وجود طورين لتطور الجريان وفق **الإتجاه الطولي (x)** الطور الأول يتبع قانون خطي ، وهذا يتوافق مع طور قوة العطالة. يستمر هذا الطور لبضع ثوانٍ (من ٤ إلى ٦ ثوانٍ). يظهر هذا الطور بعد حقن التيار عبر القناة بحوالي ٢ ثانية بسبب غطس التيار ضمن السائل المحيط. الطور الثاني يخضع لقانون أسي، حيث تهيمن في هذا الطور قوة اللزوجة. أما تطور الجريان وفق **الإتجاه العرضي (y)** يتبع قانون أسي $y \sim t^n$.

في **الاتجاه العمودي (z)**، تمكنا من التمييز بين طورين أيضا فالطور الأول استمر لمدة ثانيتين، وهو بالتالي قصير جدًا حيث يكون سمك طبقة الخلط (المزج) كبيرًا نسبيًا. تتوافق هذه المرحلة مع انحدار وغطس التيار الثقالي ضمن السائل المحيط. في الطور الثاني، تظل سماكة طبقة المزج ثابتة تقريبًا بمرور الوقت مع وجود طبقة حدية

واضحة تعكس انخفاض السرعة عند جبهة التيار الثقالي. يوضح الشكل (٧) تأثير الملوحة، أي تركيز الملح في السائل المحيط ورقم رينولدز على سماكة طبقة المزج. ونلاحظ أن ازدياد الملوحة في السائل المحيط تجعل هذه السماكة أقل أهمية، ويرجع ذلك إلى قوة الطفو (دافعة أرخميدس). كما نلاحظ ازدياد سماكة طبقة المزج بازدياد رقم رينولدز.



الشكل (٧): (a) تأثير تركيز الملح في السائل المحيط (b) تأثير رقم رينولدزعلى سماكة طبقة المزج

استنتاجات و توصيات

لقد قمنا بدراسة انتشار التيار الثقالي. باستخدام تقنية المخططات الزمانية المكانية، قمنا بقياس التطور الزمني للتقدم x ، والانتشار العرضي y وعمق طبقة المزج z . وجدنا من خلال التجارب، أن التطور الأمامي في البداية يتبع علاقة زمنية خطية تدوم لبضع ثوان. ثم تنقلب هذه العلاقة لعلاقة أسية من الشكل $x \sim t^m$، أما الإنتشار العرضي فكانت علاقته الزمنية علاقة أسية من الشكل $y \sim t^n$. فيما يتعلق بسماكة طبقة المزج وجدنا أن هذه السماكة تنخفض مع ازدياد ملوحة السائل المحيط و تزداد مع ازدياد رقم رينولدز.

و ربما سيكون من المفيد في الدراسات اللاحقة دراسة تأثير لزوجة التيار الثقالي على الجريان وفق الإتجاهات x, y, z

المراجع

[1] Simpson J. E., Gravity current: In the Environment and the Laboratory, 2nd ed. Cambridge University Press, 1997.

[2] Huppert H. & Simpson J. E., The slumping of gravity currents, J. Fluid Mech. 99, 4, 785-799, 1980.

[3] Benjamin T. B., Gravity currents and related phenomena, J. Fluid Mech. 31, 1960.

[4] Fay, J. A., the spread of oil slicks on a calm sea, 1969.

[5] Hoult, D. P., In Oil on the sea (ed. D. P. Hoult), 33-63 Plenum.

[6] Didden, N., Maxworthy, T., the viscous spreading of plane and axisymetric gravity current, J. Fluid Mech. 121, 1982.

[7] Fannelop, T. K. and Waldman, G. D., Dynamics of Oil slicks. AIAA Journal, 10(4), 1972.

[8] F.D.Vinna, B.A.Farenzena, M.S.Pinho., Spatiotemporal flow features in gravity currents using computer vision methods. School of Technology- Univ Riocrand do sul Brazil

[9] E.P.Francisco, L.F.R.Esnath, S.Laizet., Rynolds number and setting velocity influence for finite rlease particle- landen gravity currents in a basin. Computers and Geosciences vol 110-page 1-9, 2018.