حركة وتحريك السوائل

عند دراسة السوائل المتحركة يمكن التمييز بين حالتين:

a) الحالة الأولى: حيث يعطى تيار السائل ويطلب معرفة القوى المؤثرة عليه (وتدعى غالباً بالمسألة الخارجية).

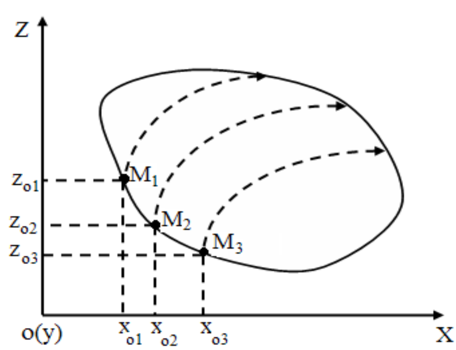
b) الحالة الثانية: تعطى في هذه الحالة القوى التي تؤثر على السائل (وخاصة القوى الحجمية، قوى الثقالة،... الخ) ويطلب تحديد الخواص الهيدروديناميكية لتيار السائل (السرعة، الضغط، .....) وتدعى بالمسألة الداخلية.

3.1- الطرق التحليلية (*Analytical Methods*) الأساسية لدراسة حركة السوائل:

تتبع في دراسة حركة السوائل بهدف تحديد حقل السرعة (*Velocity Field*) وحقل التسارع (*Acceleration Field*) طريقتين أساسيتين: طريقة لاغرانج وطريقة أويلر:

3.1.1- طريقة لاغرانج (*Lagrangian Viewpoint*) لدراسة حركة السوائل:

نقتطع جزء (K) من مساحة جريان سائل ما (الشكل (3.1)) ونعين الإحداثيات الثابتة (ox)، (oy)، (oz).



الشكل (1.3)، طريقة لاغرانج لدراسة حركة السوائل.

لندرس مجموعة الجزئيات السائلية (M_1)، (M_2) و(M_3) التي تقع جميعها في لحظة البدء على حدود المساحة المدروسة. فإذا كانت إحداثيات النقاط المذكورة عند الزمن $(t=0)$ هي (x_0)، (y_0) و(z_0) على التوالي، فإنه يمكن تعيين موقع الجزيء الحجمي في أية لحظة أخرى بالإحداثيات:

$$\begin{aligned} x &= f_1(x_0, y_0, z_0, t) \\ y &= f_2(x_0, y_0, z_0, t) \\ z &= f_3(x_0, y_0, z_0, t) \end{aligned} \qquad (3.1)$$

باستخدام العلاقة (3.1) يمكن بسهولة رسم مسار الجزيئات السائلية المذكورة. كما أنه يمكننا إيجاد طول الطريق (ds) التي يقطعها الجزيء في الزمن (dt) في أي موقع من هذه المسارات، وبالتالي تحديد السرعة وكذلك التسارع لأي جزيء حجمي (M) وفي أية نقطة من المسار وذلك بالاشتقاق الجزئي بالنسبة للزمن لمرة أو مرتين:

$$u = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial f_1(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t}; \quad a_x = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f_1(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t^2}$$

$$v = \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial f_2(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t}; \quad a_y = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f_2(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t^2}$$

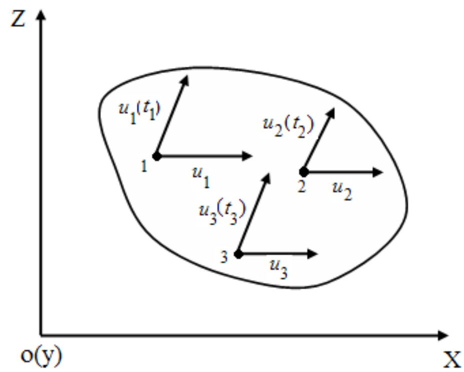
$$w = \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial f_3(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t}; \quad a_z = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f_3(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t^2}$$

وبسبب أن هذه الطريقة تعتمد في دراسة حركة السائل على تتبع مصير كل جزيء حجمي منه لذلك يطلق على هذه الطريقة اسم الطريقة المادية.

3.1.2- **طريقة أويلر** (*Euler's Viewpoint*):

نتصور جزء من حقل الجريان لسائل ما (الشكل (3.2)) وخلافاً لطريقة لاغرانج فإن طريقة أويلر لاتهتم بتتبع مسار الجزيء الحجمي بل تركز على معرفة سرعة الجزيئات

في النقاط المختلفة من حقل الجريان وبالتالي تحديد حقل السرعة وتغيره مع الزمن، فإذا كانت لدينا النقاط (1)، (2) و(3) والتي تعتبر ثابته بالنسبة للسائل الذي يمر فوقها.



الشكل (1.3)، طريقة أويلر لدراسة حركة السوائل.

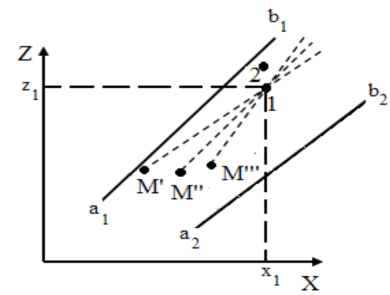
ففي اللحظة (t_1) سيكون في النقطة (1) إحدى الجزيئات السائلية ذات سرعة معينة $[u_1(t_1)]$ وبنفس اللحظة ستكون للسرعة في النقطة (2) القيمة $[u_2(t_1)]$ وفي النقطة (3) القيمة $[u_3(t_1)]$.

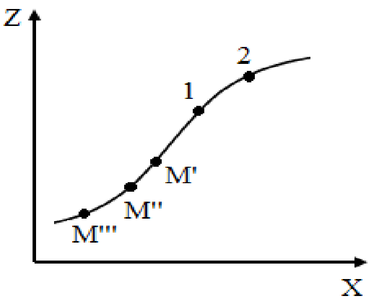
في اللحظة الثانية ستكون السرع في النقاط (1)، (2) و(3) كمايلي $[u_1(t_2)]$، $[u_2(t_2)]$ و$[u_3(t_2)]$ أي أننا بشكل عام سوف نحصل على حقل سرعة جديد، وهذا مايميز طريقة أويلر التي تعتبر نقطة معين وتبحث عن تغير السرعة في تلك النقطة مع الزمن وبذلك يتم ربط القيم الهيدروديناميكية بالمكان والزمان.

إن طريقة لاغرانج وبسبب صعوبتها لم تلاق نجاحاً عملياً وسنعتمد في دراسة حركة السوائل على طريقة أويلر، حيث سنقتصر على تتبع حركة جزيئات السائل ليس على طول الزمان (t)–كما في طريقة لاغرانج– وإنما خلال اللحظة (dt) التي تمر خلالها الجزيئة السائلية عبر النقطة الفراغية (M).

3.3- الجريانات المستقرة (*Steady Flow*) وغير المستقرة (*Unsteady*):

ليكن تيار السائل المحدد بالخطين (a_1b_1)، (a_2b_2) كما في الشكل (3.3)، نأخذ النقطة (1) التي سنعتبرها ثابتة عند مرور السائل من خلالها، ثم نحدد عدداً من الجزئيات السائلية (M) التي تتحرك على مسارات مختلفة تمر جميعها في الحالة العامة من النقطة (1) في لحظات زمنية مختلفة، حيث (M') تمر في اللحظة (t')، (M'') في اللحظة (t'') وهكذا.





الشكل (3.3) مخطط مسار الجزئيات السائلية عند الحركة غير المستقرة

الشكل (3.4) مخطط مسار الجزئيات السائلية عند الحركة المستقرة

عند الجريان غير المستقر فإن السرعة (u) في كل نقطة (النقطة (1) مثلاً)، تتغير مع مرور الزمن، أي أنه في الحالة العامة نحصل على مايلي: عند مرور الجزيء (M') من النقطة (1) سيكون له في هذه النقطة وعند مرور الزمن (t') السرعة (u'). وعند مرور الجزيء (M'') من النقطة (1) عند لحظة زمنية مختلفة (t'') سيكون له سرعة مختلفة (u'').

في النقطة (2) تحدث أيضاً نفس الصورة كما في النقطة (1)، وبالتالي فعند الجريان غير المستقر يكون:

$$u = f_1(x, y, z, t) \qquad (3.9)$$

أما في حالة الجريان المستقر، تتميزكل نقطة من حقل الجريان (حتى بمرور الزمن) بسرعة ثابتة وذلك بالقيمة والاتجاه. في هذه الحالة تكون سرعة كل جزيء حجمي يصل إلى نقطة معينة تساوي تماماً إلى سرعة الجزيء الذي غادر لتوه تلك النقطة. وينطبق ذلك على بقية القيم الهيدروديناميكية كالضغط والكثافة مثلاً فهي كلها توابع مكانية صرفة:

$$u = f_1(x,y,z)$$
$$p = f_2(x,y,z) \qquad (3.10)$$
$$\rho = f_3(x,y,z)$$

أي أن السرعة (u) لاتتعلق بالزمن عند الجريان المستقر وبالتالي يكون:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial u_y}{\partial t} = \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \qquad (3.11)$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

الواقع أنه لايجوز كتابة الشرط (3.11) بشكل مطلق عند الجريانات المستقرة ذلك لأن هذا يعني أن السرعة ثابته ولاتتغير مع الزمن بينما كثيراً مايتغير اتجاه السرعة.

تتصف مسارات الجزئيات (M) التي تمر من نقطة واحدة عند الجريان المستقر (انظر الخطوط M′-1 ، M″-1 ، M‴-1 من الشكل (3.3)) بمايلي:

- لاتتطابق هذه المسارات مع بعضها لتصبح مساراً واحداً.
- لاتتغير هذه المسارات مع الزمن.

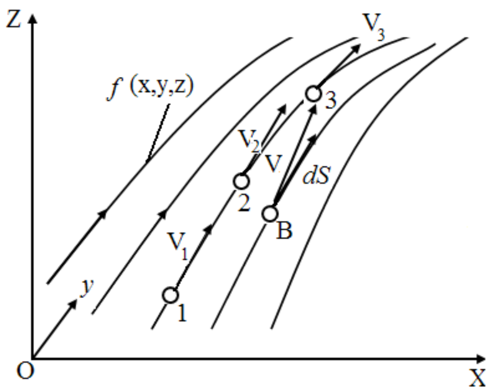
وهكذا يؤول شكل المسارات إلى الشكل المتمثل في الشكل (3.4) الذي يمثل مسارات الجزئيات عند الجريان المستقر.

تكتسب الجزئية (M′) عند مرورها بالنقطة (1) سرعة (u_1) وجهة معينة وعند وصولها إلى النقطة (2) تكتسب سرعة (u_2). ثم تتلوها الجزئية (M″) التي تكتسب عند وصولها إلى النقطة (1) سرعة مقدارها (u_1) ثم تتجه إلى النقطة (2) وهكذا.

3.4- خط التيار (*Stream Line*) وأنبوبة التيار (*Stream Tube*):

وفقاً لطريقة أويلر المكانية، التي تعتمد على تحديد حقل السرعة من حيث القيمة والاتجاه، يمكن الحصول على صورة واضحة للجريان برسم مجموعة من المنحنيات المتجاورة بعد حسابها نظرياً أو تحديدها تجريبياً بالتصوير الفوتوغرافي (باستخدتم طريقة الترئية كالتلوين بالحبر أو الدخان أو رش ندف من المواد الصلبة الخفيفة مثل وريقات

الألمنيوم) حيث تكون في لحظة معينة أشعة السرعة لكافة الجزئيات السائلية الواقعة عليها مماسة لها في كل نقطة، أمثال هذه المنحنيات تسمى خطوط التيار.

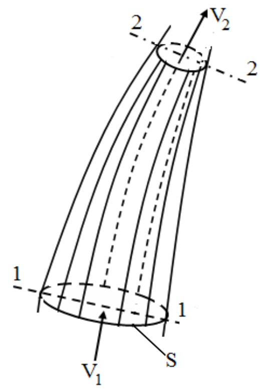


الشكل (3.5)، تعريف خط التيار.

1. في حالة الجريان المستقر تنطبق صورة خط التيار مع صورة خط المسار (*Path Line*)، فإذا عرفنا أن المسار (*Path*) هو الطريق الفعلية التي تسلكها الجزيئة السائلية في حقل الجريان وهو يبين اتجاهات السرعة التي تأخذها الجزيئة تباعاً مع الزمن يمكننا القول إن خطوط التيار تمثل وساطة هندسية لتوضيح حركة السائل، ومن معرفة صورة خطوط التيار يمكن تحديد اتجاه الجريان في كل نقطة. ويعتبر خط التيار عند الجريان المستقر مساراً ثابتاً مع الزمن للجزيئات السائلية المتعاقبة (الخط $2-1-M'-M''-M'''$ من الشكل (3.4))
2. في حالة الجريانات غير المستقرة تكون مركبات السرعة تابعة للمكان والزمان وبالتالي فإن خطوط التيار تغير شكلها مع الزمن ولاتكون متطابقة مع خطوط المسار.

انطلاقاً من مفهوم خط التيار نصل إلى مفهوم أنبوبة التيار، فإذا اعتبرنا داخل حقل الجريان منحنياً مغلقاً (S) –الشكل (3.6)– وأخذنا كافة خطوط التيار التي تمر من نقاط هذا المنحني، نحصل على سطح أنبوبي الشكل يسمى أنبوبة أو سطح التيار،

وإن أنبوبة التيار لاتسمح بنفوذ السائل عبر جدارها لأن ذلك سيعني وجود مركبة للسرعة عمودية على خط التيار وهذا يتناقض مع تعريفه.



الشكل (3.6)، أنبوبة التيار.

تبقى في حالة الجريان المستقر كل أنبوبة تيار محافظة على شكلها وموضعها في حقل الجريان أما في حالة الجريان غير المستقر فيكون لأنبوبة التيار شكل آني فقط، ذلك أنه بين لحظة وأخرى تتبدل الجزيئات السائلية التي تكوّن أنبوبة التيار.

يطلق على كمية السائل داخل أنبوبة التيار اسم خيط التيار (*Stream filament*) وتتحرك جزيئاته في اتجاه وحيد منطبق على محور أنبوبة التيار الذي يسمى خط التيار المركزي (*Central Stream Line*). ومن هنا جاءت تسمية الجريانات وحيدة البعد (*One-dimensional Flow*) كالجريان في الأنابيب مثلاً باسم نظرية خط التيار حيث يفترض أن السرعة (المثالية أو الوسطية) تكون موزعة بانتظام على كامل مقطع الأنبوبة وتتغير في اتجاه الجريان فقط.

وبشكل عام نميز بين ثلاث حالات لجريان السائل:

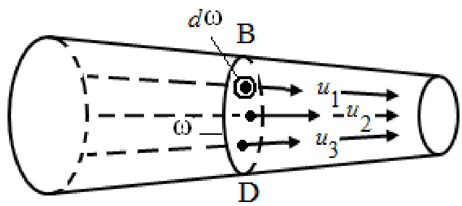
1. فقد يتصف الجريان بأن مسارات جزيئاته مستقيمة ومتوازية فيما بينها وهذا نادر الحدوث حيث تنتمي معظم الجريانات إلى أحد النوعين التاليين:
2. جريان سلس التغيير: وهذا النوع من الجريان يجب أن يحقق الشرطين التاليين:
   - أن يكون نصف قطر انحناء خطوط التيار (المسارات) كبيراً جداً.

- أن تكون خطوط التيار متوازية تقريباً والزاوية بينها قريبة جداً من الصفر.

3. جريان حاد التغير: حين لايحقق الجريان الشروط السابقة يوصف بأنه جريان حاد التغير.

3.5- المقطع الفعال (الحي) للجريان:

المقطع الحي للجريان هو سطح في حدود التدفق عمودي على اتجاه حركة السائل (الشكل (3.7)).



الشكل (3.7)، المقطع الحي (B-D).

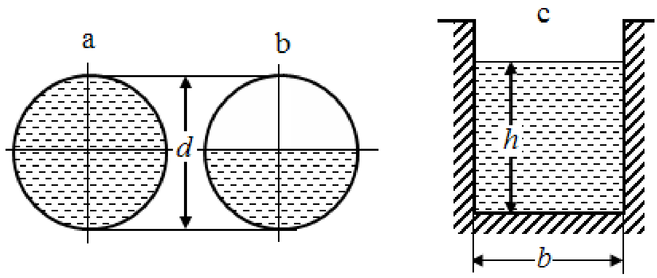
عند التغير االسلس للجريان يمكن اعتبار أن المقاطع الحية مستوية وللمقطع الحي للتدفق ثلاث ميزات رئيسية:

- مساحة مقطع الجريان (*Area of Flow Section*) ويرمز له بـ (ω).
- المحيط (*Circumference*) ويرمز له بـ ($\propto$) وهو خط تماس المقطع الحي مع جدران المجرى أوبعبارة أخرى هو قسم المحيط المبلل بالسائل المتدفق.
- نصف القطر الهيدروليكي (*Hydraulic Radius*) ويرمز له بـ (R) وهو عبارة عن النسبة بين المقطع الحي إلى المحيط المبلل، أي:

$$R = \frac{\omega}{\propto} \qquad (3.12)$$

وبشكل عام ليس لنصف القطر الهيدروليكي أي مفهوم فيزيائي، ولكن فقط بمساعدة هذه القيمة يمكن دراسة تأثير شكل وأبعاد المقطع الحي للجريان على طبيعة جريان السائل.

نحدد قيم أنصاف الأقطار الهيدروليكية لبعض المقاطع الهامة (الشكل (3.8)):



الشكل (3.8)، المقطع الحي للجريان.

1. السائل المتدفق يملأ كامل مقطع الأنبوبة الدائرية –(الشكل (3.8.a))– التي قطرها الداخلي (d):

$$R = \frac{\omega}{\propto} = \frac{\pi \cdot d^2/4}{\pi \cdot d} = \frac{d}{4} = \frac{r}{2}$$

حيث r : نصف القطر الهندسي الداخلي للأنبوبة.

2. السائل المتدفق يملأ كامل مقطع الأنبوبة الدائرية –(الشكل (3.8.b))–:

$$R = \frac{\omega}{\propto} = \frac{\pi \cdot d^2/8}{\pi \cdot d/2} = \frac{d}{4} = \frac{r}{2}$$

3. يتدفق السائل في قناة مقطعها مستطيل عرضه (b) وعمق السائل في القناة (h) –(الشكل (3.8.c))– في هذه الحالة يكون لنصف القطر الهيدروليكي القيمة التالية:

$$R = \frac{\omega}{\propto} = \frac{b \cdot h}{b + 2h}$$

وثمة تباين بين الجريان الدفعي والجريان غير الدفعي. وفي كثير من الأحيان يدعى الجريان غير الدفعي بالجريان الحر وهو التدفق الذي يتميز بسطح حر للتدفق (كتدفق الماء في نهر مثلاً)، أما الجريان الدفعي فهو التدفق الذي ليس له سطح حر بل محاط من جميع الجوانب بالجدران (جدران أنبوبة مثلاً)، ويعتبر تدفق السوائل في الأنابيب خير مثال على نظام الجريان الدفعي.

3.6- الغزارة (*Flow Rate*) والسرعة المتوسطة (*Average Velocity*):

تدعى كمية السائل المار في وحدة الزمن خلال المقطع الحي للجريان بالتصريف أو الغزارة (Q):

$$[Q] = \frac{L^3}{t}$$

وغالباً ماتقاس الغزارة بواحدات (m^3/s)، (l/s) وتدعى عندها بالغزارة الحجمية (*Volume Flow*)، أما إذا قيست بـ (Kg/s) أو (Ton/s) .... الخ فتدعى بالغزارة الكتلية (*Mass Flow*).

فلو اخترنا جزء صغير ($d\omega$) من المقطع الحي للجريان، فإنه في الحالة العامة سوف تمر من خلال المساحة كمية من السائل (dQ):

$$dQ = u \cdot d\omega \qquad (3.13)$$

وبما أن السرعة (u) تختلف من نقطة لأخرى في مختلف نقاط المقطع (الشكل (3.7)) فإنه يمكن كتابة العلاقة (3.13) على الشكل التالي:

$$Q = \int_{\omega} u \cdot d\omega \qquad (3.14)$$

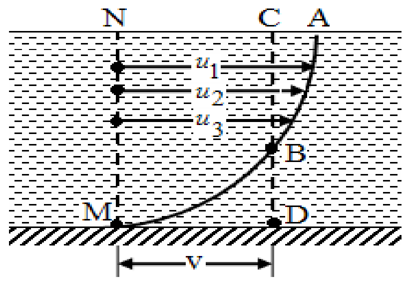
مع الأخذ بعين الاعتبار اختلاف السرعة من نقطة لأخرى في المقطع الواحد (الشكل (3.9)) حيث ($u_1 \neq u_2 \neq u_3$) وبهدف تسهيل الحسابات وفي حالة الجريانات السلسة أو مايشابهها أُدخل مفهوم السرعة الوسطية (v)-وهي سرعة اصطلاحية لاتتواجد بشكل فعلي- وتعين كمايلي:

$$\text{v} = \frac{Q}{\omega}$$

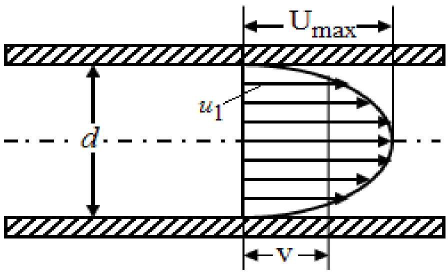
$$\text{v} = \frac{u \cdot d\omega}{\omega} \qquad (3.15)$$

وكما هو واضح فالسرعة المتوسطة (v) تعبر عن الصفات الهيدروليكية للمقطع الحي للجريان.

تتحرك جزيئات السائل بسرعتها الخاصة (u) وهي تختلف عن بعضها البعض فلو أننا حددنا أشعة السرعة (u) على كامل المقطع الحي ووصلنا بين نهايات هذه الأشعة لحصلنا على الرسم البياني (بروفيل) لتوزع السرعة (*Velocity profile*). يبين الشكل (3.10) بروفيل السرعة عند الجريان الخطي في أنبوبة دائرية الشكل حيث يلاحظ أن السرعة تكون أعظمية (U_{max}) عند محور الأنبوبة بينما تكون معدومة عند الجدار.



الشكل (3.9)، بروفيل السرعة (u) -ABMN-



الشكل (3.10)، بروفيل السرعة العظمى والمتوسطة.