الفصل الثالث
الهيدروديناميكا (الموائع المتحركة)

أهم البارامترات الأساسية في ديناميكا الموائع، هي: الضغط – الكثافة – درجة الحرارة وسرعة سريان المائع، وهي كمية متجهة، لها مقدار واتجاه، أما كل من الضغط – الكثافة – درجة الحرارة، فإنها كميات قياسية؛ أي لها مقدار وليس لها اتجاه، وجميع هذه البارامترات تملك خاصية النقطة بمعنى أنها تختلف من نقطة إلى أخرى داخلة المائع.

أنواع السريان

سريان مستمر (continuous flow) وسريان حر (free flow)

لحدوث السريان المستمر للمائع، لابد من تحقيق الشرط $(\lambda \prec d)$؛ أي ان متوسط طول المسار الحر أقل من أبعاد النظام (طوله)، ومعنى هذا أن التصادمات تحدث على فترات قصيرة، ويعرف هذا بالسريان المستمر. أما السريان الحر، فإنه يتحقق بالشرط $(\lambda \succ d)$؛ أي إن متوسط طول المسار الحر أكبر من أبعاد النظام (طوله)، ومعنى هذا أن التصادمات تحدث على فترات متباعدة.

السريان اللزج (viscous flow) وغير اللزج

السريان اللزج يعني أن جزيئات المائع تتحرك عشوائيًا؛ مما يؤدي لنقل كمية الحركة والكتلة من موضع إلى موضع آخر، ونتيجة لهذا الانتقال يحدث انتشار لكل من الكتلة – اللزوجة والتوصيل الحراري، أما السريان غير اللزج، فإنه لايوجد احتكاك في السريان.

تنشأ الظواهر الفيزيائية للزوجة والتوصيل الحراري عن انتقال كمية الحركة والطاقة عبر الحركة الجزيئية العشوائية؛ فمن المعلوم أن كل جزئ له كمية حركة وطاقة، تنتقل مع الجزيء من مكان إلى آخر في المائع، قبل تصادمه بجزيء آخر، وبحدوث التصادم يحدث انتقال لكمية الحركة، وهذا التأثير

الماكروسكوبي يسمى لزوجة، أما عن انتقال الطاقة من جزئ الى أخر، فإنه أيضًا تأثير ماكروسكوبي، ويسمى التوصيل الحراري. وبالتالي نجد اللزوجة والتوصيل الحراري توصف بظواهر الانتقال. وهناك معنى للزوجة في معامل اللزوجة (μ)؛ حيث يتناسب إجهاد القص ξ طرديًا مع ميل السرعة $\nabla.v$:

$$\xi \propto (\nabla.v)$$

$$\xi = \mu(\nabla.v)$$

$$\nabla.v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

أيضًا ثمة معنى للتوصيل الحراري في معامل التوصيلية الحرارية κ (μ)؛ حيث يتناسب معدل الحرارة الموصلة لكل وحدة مساحة q° طرديا مع ميل درجة الحرارة $\nabla.T$

$$q^{\circ} = -\kappa\nabla.T$$

السريان المضغوط والغير مضغوط

يقال إن السريان مضغوط، إذا كانت كثافة المائع متغيرة، ويقال السريان غير مضغوط إذا كانت كثافة المائع ثابتة.

يقال إن المائع لزج ومضغوط، إذا كان تحقق الشرط $M \geq 0.3$ حيث M عدد ماخ (Mach).

أما إذا كان $M \prec 0.3$، فإن السريان عندئذ غير مضغوط.

نطاق عدد ماخ (Mach)

سرعة سريان المائع أقل من سرعة الصوت، إذا كان $M \prec 1$ (Subsonic)، وتكون سرعة سريان المائع مساوية لسرعة الصوت إذا كان $M = 1$ (Sonic)، وتكون سرعة سريان المائع أكبر من سرعة الصوت، عندما تكون $M \succ 1$ (Supersonic)، وتكون أكبر بكثير من سرعة الصوت، عندما تكون $M \succ 5$ (hypersonic)، وعندما تكون سرعة السريان أكبر من سرعة الصوت، تتولد موجة الصدمة.

المعادلات الأساسية لديناميكا الموائع

١- معادلة الاستمرارية

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0$$

وهذه المعادلة تحقق قانون حفظ الكتلة في حالة السريان غير الثابت unsteady، وهذا يعني أن الكثافة ρ تكون دالة في الفراغ والزمن $\rho = \rho(x,y,z,t)$. أما في حالة الثبات steady state، تكون الكثافة ρ دالة في الفراغ فقط $\rho = \rho(x,y,z)$؛ أي $\partial/\partial t = 0$ ، وتصبح معادلة الاستمرارية في الصورة الآتية

$$\nabla.(\rho v) = 0$$

٢- معادلة كمية الحركة

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla.(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho f_x + (\zeta_x)_{visc}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla.(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho f_y + (\zeta_y)_{visc}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla.(\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho f_z + (\zeta_z)_{visc}$$

وتسمى هذه المعادلة Navier - Stokes، وهذه المعادلة تتحقق في السريان اللزج (viscous flow)، وتعرف $\zeta_{x,y,z}$ بمركبات إجهادات القص اللزجة، أما $\rho f_{x,y,z}$ هي مركبات القوى (قوة كهرومغناطيسية – جاذبية وغيرها)، أما $\partial p/\partial t$ هي قوى الضغط.

في حالة السريان غير اللزج، تصبح المعادلة:

$$\nabla.(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\nabla.(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\nabla.(\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

وهذه المعادلة تسمى معادلة أويلر Eulers.

٣- معادلة الطاقة

في حالة عدم الثبات unsteady state تكتب معادلة الطاقة في الصورة الآتية:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho(e+v^2/2)]+\nabla.[\rho(e+v^2/2)v]=\rho q^{\cdot}-\nabla.(pv)+\rho(f.v)+Q^{\cdot}_{visc}+W^{\cdot}_{visc}$$

الطرف الأيسر للمعادلة عبارة عن شقين: الشق الأول يوضح معدل التغير الزمني للطاقة الكلية داخل الحجم v؛ نتيجة تغيرات مجال السريان، والشق الثاني هو معدل السريان للطاقة الكلية (الداخلية e. والحركية $v^2/2$، عبر سطح التحكم control surface).

أما الطرف الأيمن من المعادلة، فإنه يتكون من أربعة أجزاء: الأول يمثل معدل التسخين الحجمي، والثاني يمثل معدل الشغل المبذول على المائع الناشئ عن قوة الضغط، والثالث يمثل معدل الشغل المبذول على المائع الناشئ عن قوى الأجسام، أما الرابع فهو يمثل معدل الحرارة الناشئة عن تأثير اللزوجة، والخامس يمثل معدل الشغل المبذول على المائع الناشئ عن إجهاد القص؛ نظرًا لأن السريان لزج.

في حالة الثبات steady state، فإن هذا يعني $\partial/\partial t = 0$، وأن السريان غير اللزج inviscid يعني $Q^{\cdot}_{visc} = 0$، وأيضًا $W^{\cdot}_{visc} = 0$. أما السريان الأديباتي adiabatic يحقق $q^{\cdot} = 0$، وبإهمال قوى الأجسام $f = 0$، تصبح معادلة الطاقة عندئذ في الصورة الآتية:

$$\nabla.[\rho(e+v^2/2)v] = -\nabla.(pv)$$

ونلاحظ أن المعادلات الثلاثة (معادلة الاستمرارية - معادلة كمية الحركة - معادلة الطاقة) تحتوي على أربعة متغيرات أساسية، هي: الكثافة ρ، والضغط p، والسرعة v، والطاقة الداخلية e، وبالتالي فإننا نحتاج لمعادلة رابعة، وهي:

$$e = C_v T$$

حيث T هي درجة الحرارة وهي متغيرة وهذا يتطلب معادلة خامسة وهي

$$P = \rho R T$$

حيث R ثابت الغاز العام.

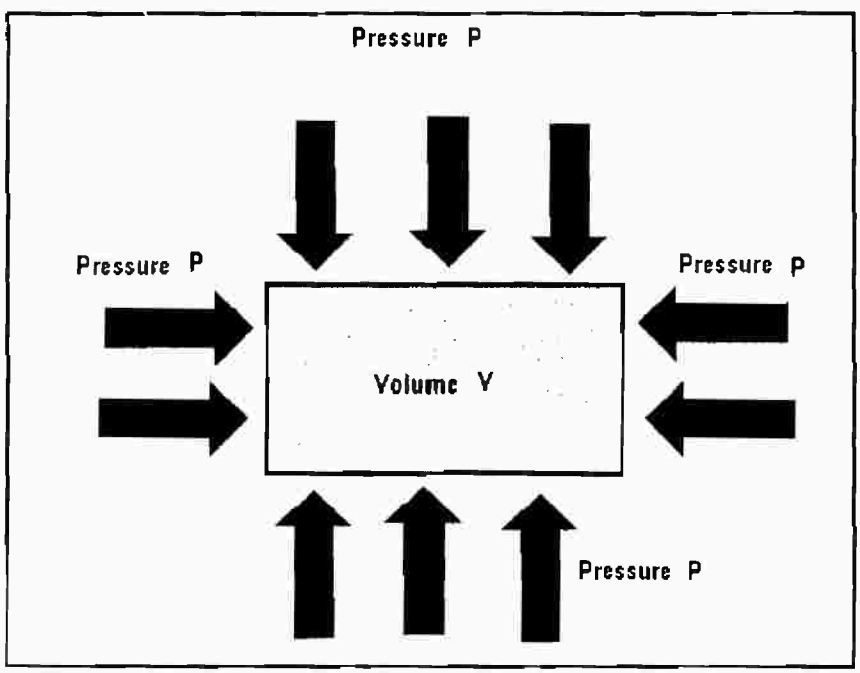
السريان المضغوط Compressible flow

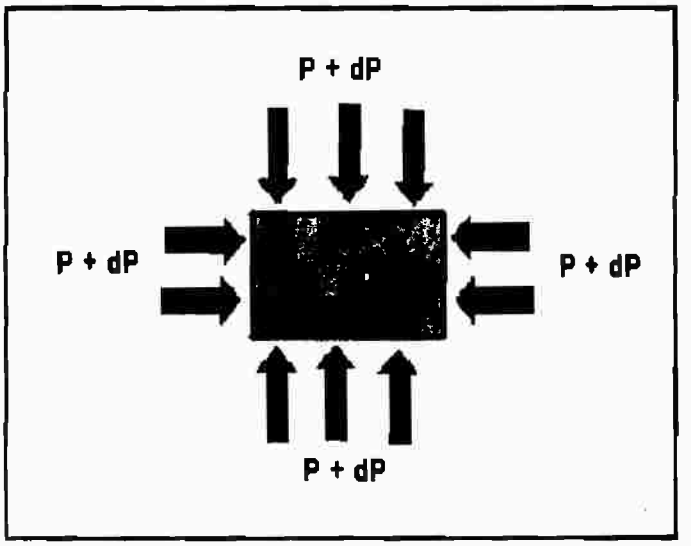
في حالة السرعة العالية للسريان، تصبح الكثافة متغيرة، ويكون بالتالي السريان مضغوطًا والمفهوم الفيزيائي لدى السرعة العالية لسريان المائع أنه يحدث تحول للطاقة الحركية إلى طاقة داخلية للمائع، تعمل على تغير درجة حرارته.

الانضغاطية (τ) Compressibility

$$\tau = -\frac{1}{v}\frac{dv}{dp}$$

وهذه العلاقة تعني حدوث تغير جزئي في حجم المائع، لكل وحدة تغير في الضغط، ويقال إن السريان مضغوط عندما يتحقق $M \geq 0.3$ ، ويتضح الشكل الفيزيائي لهذه العلاقة من الرسم المبين بالشكل (١). الانضغاطية في الغازات أكبر منها في الموائع.





شكل (١)

موجات الصدمة

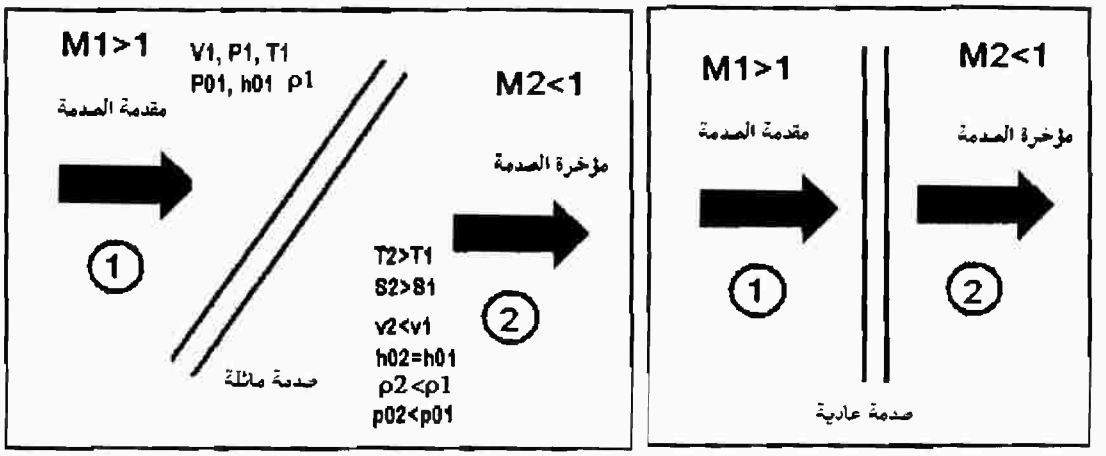
تتولد موجات الصدمة نتيجة سريان المائع بسرعة أكبر من سرعة الصوت؛ أي إن عدد ماخ أكبر من واحد (عدد ماخ هو النسبة بين سرعة سريان المائع وسرعة الصوت)

وموجة الصدمة إما أن تكون متعامدة (قائمة)، أو مائلة كما بالشكل (٢).

وفي الحالتين، المائلة والعمودية، فإن موجة الصدمة هي عملية انضغاطية سريعة، يزداد الضغط بصورة متقطعة عبر الموجة. ويكون السريان عبر موجة الصدمة اديباتيكي (إضافة حرارة إلى النظام دون نقص منه)، ويكون الأنثالبي الكلي ثابتًا h_0 :

$$h_0 = h + v^2/2$$

حيث h هو الإنثالبي الإستاتيكي، و $v^2/2$ هي طاقة الحركة.



شكل (٢)

أيضا في الحالتين المائلة والعمودية لموجة الصدمة، تكون سرعة السريان في مقدمة موجة الصدمة أكبر من سرعة الصوت (supersonic)، ولكن في مؤخرة الصدمة العمودية تكون سرعة السريان أقل من سرعة الصوت، أما مؤخرة الصدمة المائلة، تكون سرعة السريان أكبر من سرعة الصوت، ولكن سرعة السريان في مؤخرة موجة الصدمة أقل من سرعة السريان، في مقدمة الصدمة.

موجة الصدمة العمودية

توجد حقائق فيزيائية نحو السريان عبر موجة الصدمة العمودية، هي:

١- السريان يكون ثابتًا $(\partial/\partial t = 0)$.

٢- السريان يكون إديابتيكيًا $(q = 0)$. $q = const.$ ؛ أي إن النظام لا يكتسب ولا يفقد حرارة. ولكن إذا زادت درجة الحرارة عبر الصدمة، فذلك ليس معناه اكتساب حرارة إلى النظام، ولكن يحدث تحويل جزء من طاقة الحركة إلى طاقة داخلية، تعمل على تغيير درجة الحرارة عبر الصدمة.

٣- لا يوجد أي تأثير لدى اللزوجة.

٤- لا توجد قوى الأجسام $(f = 0)$.

المعـــادلات الأساســـية لموجة الصدمة العمودية

معادلة الاستمرارية:

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

معادلة كمية الحركة:

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2$$

معادلة الطاقة:

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2}$$

معادلة الإنثالبي:

$$h_2 = C_p T_2$$

معادلة الحالة:

$$p_2 = \rho_2 R T_2$$

من هذه المعادلات، توجد خمسة متغيرات $(\rho_2, u_2, p_2, h_2, T_2)$، يمكن الحصول عليها بحل هذه المعادلات.

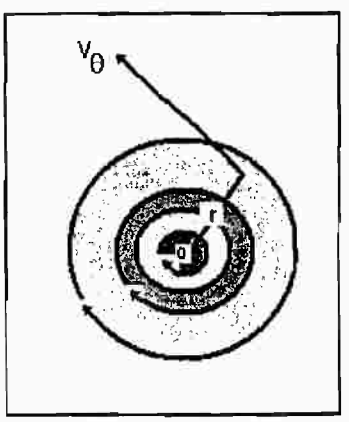
السريان الدردور Vortex flow

في السريان الدردوري، تكون خطوط الأنسياب عبارة عن دوائر متحدة المركز حول نقطة الأصل o، كما بالشكل (٣):

$$v_\theta = \frac{const}{r} = \frac{C}{r}$$

$$v_\theta = -\Gamma / 2\pi r$$

حيث Γ هي شدة الدردور



شكل (٣)

البلازما كمائع

لحسن الحظ أن معظم ظواهر البلازما تفسر بنظرية نموذج المائع (two fluid model)، ولكن الفرق بين البلازما والمائع، هو أن مائع البلازما يحتوي على شحنات كهربية (أيونات وإلكترونات)، وأن التصادمات بينها غير متكررة.. أما المائع العادي التصادمات متكررة بين الجسيمات، فتعمل على حفظها في عنصر المائع. وعلى الرغم من هذا الفارق، إلا أن النموذج صالح للتطبيق.

توصف التيارات الكهربية في البلازما بنموذج المائعين (أيونات وإلكترونات)، وحركة كليهما توصف بمعادلات ديناميكا المائع السابق شرحها.

نموذج المائعين (two fluid model)

نفرض أن الإلكترونات تتحرك بسرعة v_e، وأن الأيونات تتحرك بسرعة v_i، والفرق بين السرعتين $(v_i - v_e)$، وتعطى كثافة التيار j بالعلاقة:

$$j = zen_i v_i - en_e v_e \quad (1)$$

حيث ze شحنة الأيون، e شحنة الإلكترون، والتعادلية الكهربية $zn_i \approx n_e \equiv n$ وبالتالي كثافة التيار j تعطى بالعلاقة:

$$j \approx ne(v_i - v_e) \quad (2)$$

ومن هذه العلاقة يوجد تيار طالما يوجد سرعة نسبية $(v_i - v_e)$ بين الأيونات وإلكترونات، وبفرض أن السرعات ثابتة مع الزمن (steady state)، ولا يوجد مجال مغناطيسي، فإن نموذج المائعين يكون مطابقًا لقانون أوم، والذي يعني التطابق في التوصيلية σ، بالإضافة إلى تساوي كمية الحركة، التي تكتسبها إلكترونات من المجال الكهربي E مع كمية الحركة، التي تفقدها بالتصادم مع الأيونات، حيث: كمية الحركة المكتسبة هي eE، والمفقودة هي $\frac{m}{\tau}(v_e - v_i)$، حيث τ التوسط الزمني الحر بين التصادمات، وبالتساوي بين كمية الحركة المكتسبة eE، والمفقودة $\frac{m}{\tau}(v_e - v_i)$:

$$\frac{m}{\tau}(v_e - v_i) = eE$$

$$v_i - v_e = \frac{eE}{m}\tau \quad (3)$$

من العلاقتين (2) و (3) نحصل على العلاقة:

$$j = \frac{ne^2\tau}{m} E \qquad (4)$$

هذه العلاقة تتوافق مع قانون أوم:

$$j = \sigma\ E \qquad (5)$$

من العلاقتين (4) و (5) نحصل على العلاقة:

$$\sigma = \frac{ne^2}{m}\tau \qquad (6)$$

ومن العلاقة (6) نستنتج ان قانون أوم ينطبق على البلازما، في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي.

في حالة عدم الثبات (unsteady state)، أي إن عمليات البلازما تعتمد على الزمن. وفي حالة عدم وجود المجال مغناطيسي الخارجي الثابت، يوجد نوع واحد من تذبذب البلازما، وهذا التذبذب كهروستاتيكي، ويعرف باسم تذبذب البلازما، ويعطى بالعلاقة:

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / m_e \varepsilon_\circ} \qquad (7)$$

والتردد الطبيعي يعطى بالعلاقة:

$$f_\circ \cong 8.96\sqrt{n}\ \text{Hz} \qquad (8)$$

حيث n عدد إلكترونات لكل متر مكعب.

وهذا التردد يعرف باسم تردد البلازما أو تردد البلازما (Langmuir)، وهي كمية أساسية مميزة للبلازما حيث يمكن حساب عديد من الظواهر المختلفة في الطبيعة والمعامل؛ فنجد على سبيل المثال موجات الراديو القادمة من الهالة الشمسية إلى الأرض، تنبعث من بلازما ذات كثافة قدرها 10^{14} particles/m^3، والتردد المناظر لهذه الكثافة تقريبا 100MHz، وهو ماينا ظر الطول الموجي في حدود المترات. معظم تجارب التفريغ الكهربي في معامل البلازما تقدر قيمة كثافة البلازما 10^{18} particles/m^3، والتردد المناظر لهذه الكثافة تقريبًا 10000MHz، وهو ماينا ظر الطول الموجي في حدود السنتيمترات. أما مفاعلات الاندماج النووي الحراري، فإن قيمة كثافة البلازما تكون في حدود

10^{22} particles/m^3 ويكون التردد في حدود 10^{12} Hz، وهو ماينـاظر الطـول الموجي في حدود الملليمترات.

هناك كميات أخرى، يمكن التعبير عنها بدلالة تردد البلازما. ومن أهم هـذه الكميات توصيلية البلازما σ، وتعطى بالعلاقة:

$$\sigma = \omega_{\circ}^{2} \varepsilon_{\circ} \tau \qquad (9)$$

عند وضع البلازما تحت نفوذ المجال المغناطيسي B، يصبح نموذج المـائع معقدًا تماما. يخضع التيار الذي يسري بمحاذاة المجال B لقانون أوم بالقيمـة المعتادة للتوصيلية، وهذه القيمة تسمى التوصيلية الطوليـة $\sigma_{//}$. نفـرض أن الإلكترونات تتحرك تحت تأثير نفوذ مجال كهربي E خارجي، ويتسبب هذا المجال في وجود تيار مستعرض (Hall current)؛ مما يجعل توصيلية البلازما متابينة الخواص (anisotropic). ومن أهم خواص هذه التوصيلية:

١- تتناسب التوصيلية العمودية على المجال B عكسيا مع مربـع المجـال $(\sigma_{\perp} \propto 1/B^{2})$.

٢- التيار لايمر فقط موازيا للمجال E، بل يمر عموديا عليه (Hall effect).

البلازما التي تؤدي الكتروناتها عديدًا من التـدويم الـسيكلتروني (cyeltron gyration) بين التصادمات، تعرف باسم البلازما الممغنطة (magnetoplasma). التوصيلية المتباينة الخواص في البلازما الممغنطة تكون التوصيلية الطوليـة، أكبر بكثير من التوصيلية العمودية، وبالتالي يكون التيـار العمـودي علـى المجال الكهربي أكبر من التيار الموازي للمجال E.

الجسيمات السريعة لها فرصة تصادم مع الجسيمات الأخرى، تكـون أقـل، وسرعة الجسيمات تكون في زيادة مستمرة، عند تحركها على طول خطـوط المجال المغناطيسي. وفي وجود التصادمات المتكررة، تقل سرعة الجسيمات كذلك بتحركها عموديًا على خطوط المجال المغناطيسي بإكراه الجسيمات على التدويم في مدارات سيكلوترونية، وتزداد بالتالي تـزداد فـرص التعـرض للتصادم. في البلازما تامة التأين (fully ionized) التوصـيلية الطوليـة ضـعف التوصيلية العمودية. في البلازما المتأينة جزئيًـا (partially ionized)، والتـي تحتوي على جسيمات متعادلة، تكون متابينة الخواص بهـا قليلـة. وخلاصـة القول، أن البلازما عديمة التصادم تسلك سلوك المائع المتصادم، ولاتنطبـق

بالطبع نظرية المائع على الجسيمات، التي تتحرك على طول خطوط المجال المغناطيسي، ولكن تنطبق النظرية على الجسيمات، التي تتحرك عموديًا على المجال.

معادلة الحركة للمائع

في حالة البلازما تامة التأين، التي تحتوي على نوعين من الجسيمات (الأيونات والإلكترونات)، وتتفاعل مع بعضها في غياب التصادمات بسبب المجالات الكهربية والمغناطيسية الناشئة عن تلك الجسيمات. ويمكن الحصول على معادلة الحركة للمائع من معادلة الحركة للجسيم الفردي:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = e(E + \vec{v} \times \vec{B}) \qquad (10)$$

وبفرض عدم وجود تصادمات وحركات حرارية، عندئذ تتحرك كل الجسيمات مع بعضها في عنصر واحد، هو عنصر المائع، ومتوسط السرعة $\vec{u}$ للجسيمات هي نفس سرعة الجسيم على حدة $\vec{v}$، وبضرب المعادلة (10) في الكثافة n والتعويض عن $\vec{v}$ بدلالة $\vec{u}$، نحصل على العلاقة:

$$mn\frac{d\vec{u}}{dt} = ne(E + \vec{u} \times \vec{B}) \qquad (11)$$

وباستخدام العلاقة الرياضية:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}.\vec{\nabla})\vec{u} \qquad (12)$$

نحصل على:

$$mn\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}.\nabla)\vec{u}\right] = ne(E + \vec{u} \times \vec{B}) \qquad (13)$$

وتعرف المعادلة (13) بمعادلة الحركة للمائع، في وجود القوى المغناطيسية فقط. أما في وجود قوى ميل الضغط $-\nabla p$، فإنه يضاف إلى الطرف الأيمن للمعادلة (13)، وتصبح:

$$mn\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}.\nabla)\vec{u}\right] = ne(E + \vec{u} \times \vec{B}) - \nabla p \qquad (14)$$

في حالة البلازما المتأينة جزئيا، والتي تحتوي على جسيمات متعادلة، فإنها تتصادم مع الجسيمات المشحونة (الأيونات والألكترونات)، وبالتالي يحدث تبادل لكميات الحركة وكمية الحركة المفقودة، خلال التصادمات، تتناسب مع السرعة النسبية $(u-u_{\circ})$؛ حيث $u_{\circ}$ سرعة الجسيمات المتعادلة، وبفرض أن τ التوسط الزمني الحر بين التصادمات ثابتة. وعندئذ، يكون مقدار القوة الناتجة:

$$mn(u-u_{\circ})/\tau$$

وبالتالي نحصل على معادلة الحركة:

$$mn\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}.\nabla)\vec{u}\right]=ne(E+\vec{u}\times\vec{B})-\nabla p-mn(u-u_{\circ})/\tau \qquad (15)$$

الهيدروديناميكا المغناطيسية (MHD)

علم الهيدروديناميكا المغناطيسية، فرع من فروع المعرفة الأكاديمية، التي تهتم بدراسة حركة الموائع الموصلة، في وجود المجال المغناطيسي، وأول من اهتم بدراسة MHD العالم هانز ألفين Alfven، وحصوله على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٠م. وفكرة الهيدروديناميكا المغناطيسية تقوم على أن المجالات المغناطيسية تستحث تيارات في حركة الموائع الموصلة (البلازما). والعادلات التي تصف الهيدروديناميكا المغناطيسية، هي مجموعة مؤلفة من معادلات نفير – ستوك (Navier - Stokes) لديناميكا الموائع، ومعادلات ماكسويل للكهرومغناطيسية. وهذه المعادلات التفاضلية يمكن حلها في آن واحد سواء تحليليًا أو عدديًا.

تهتم الهيدروديناميكا المغناطيسية بدراسة سلوك الموائع والغازات الموصلة كهربائيًا، مثل: المعادن المنصهرة والغازات المتأينة، عندما تجري في منطقة تخضع إلى مجالات كهربائية ومغنطيسية. وبما أنه يشمل موائع وغازات، فهو يسمى أحياناً، ميكانيكا الموائع المغنطيسية، ويسمى أحياناً أخرى علم الموائع المغنطيسية. وتتناول تطبيقات هذا العلم فروعاً كثيرة؛ ففي الفلك يساعد هذا العلم على فهم ما يحدث داخل الشمس من نشاطات، تؤدي إلى ظهور البقع الشمسية الدورية، وكذلك ما يحدث داخل النجوم الأخرى خلال دورة حياتها. وفي الجيولوجيا، يُسلط الضوء على المحرك الأرضي في اللب، وما ينجم عنه من خواص مغنطيسية وميكانيكية، ويبحث هذا العلم أيضاً في

توليد الطاقة الكهربائية مباشرة من الغازات الحارة، المندفعة المتأينة في المولّدات generators، التي تعتمد هذه الحركية المغنطيسية. كما يبحث هذا العلم في تتبع ما يحدث في الاندماج النووي، عند تسليط طاقة كهرمغنطيسية عالية جدًّا على حبابة من الديتريوم والتريتيوم في المختبر؛ لتقليد ما يحدث داخل الشمس، وفي المفاعلات النووية التي تستعمل معدن الصوديوم المصهور مبرداً فيه. وقد يكون أبرز تطبيقاته في دراسة البلازما عند محاولة حصرها في منطقة بعيدة عن جدران الحاوية، بوساطة المجالات المغناطيسية؛ ليتسنى رفع درجة حرارتها وضغطها إلى قيم، تقارب القيم المقابلة لها داخل النجوم.

والأهمية العملية للهيدروديناميكا المغناطيسية حاليا، تكمن فى أنها تلعب دورًا رئيسيًّا في الجهود القائمة؛ من أجل توليف والتحكم في الطاقة الهيدروجينية بغرض إنتاج الطاقة الكهربائية في المستقبل. وهذه الطريقة تُغني عن استخدام المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة.

الهيدروديناميكا المغناطيسية هي نظرية العيانية السائل من البلازما. المعادلات التي تتحكم في المعادلات MHD، وماكسويل، ولحظات من المعادلة فلاسوف. وهذه لحظات تسفر عن المعادلات منفصلة عن الأيونات والإلكترونات، والتي تقترن عبر الحقول، ولدت من خلال الاصطدامات. ومن الشائع استخدام السائل لمجموعة واحدة من المعادلات، التي يمكن استخلاصها من خلال تجاهل الجمود الإلكتروني، على افتراض أن حركة الإلكترون بسرعة بالمقارنة مع مقاييس المصالح. وهذا يعادل الحد من مصلحتنا مرات مقارنة طويلة لتردد الإلكترون سيكلوترون وتردد البلازما. وبهدف تبسيط الاقتضاء، في كثير من الحالات، فإنه يتم بذل مزيد من تجاهل آثار مقاوم، وهذا بافتراض أن البلازما هو موصل الكمال. المعادلات MHD

Continuity $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0$$

Momentum Balance $$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = J \times B - \nabla p$$

Equation of state $$\frac{dp}{dt} = -\gamma \ p \nabla.v$$

Amper law $$\mu_0 J = \nabla \times B$$

Faraday law $$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E$$

Ohm law $$E + v \times B = \eta J$$

$$\nabla . B = 0$$

مولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية

تشبه مولدات MHD المولدات الكهربائية التقليدية. والفرق الوحيد هو أنها تستخدم مائع موصل كهربائيًا، بدلاً من الموصلات الصلبة لتوليد الطاقة الكهربائية. أساسًا، فإن ديناميكا الموائع المغنطيسية هي منطقة بحثية، تشتمل على دراسة حركة الموائع الموصلة كهربائيًا، مثل: البلازما والمياه المالحة.

مولد MHD بسيط، يتكون من فوهة الغاز هي عبارة عن غرفة احتراق، التي يضخ فيها نبضة من الغاز في قناة / مجرى. تعمل جدران القناة باعتبارها قطبًا، ويتم تغذية التيار الكهربائي المستحث لتغذية الأحمال من قبل الدوائر الخارجية التي تزود الكهرباء المولدة إلى الوجهة المطلوبة. ويمكن بناء مولدات MHD بتصميمات مختلفة، مثل: مولد فاراداي، ومولد قاعة القرص. وكان فاراداي أول من صمم مولد MHD. وقدم من قبل مايكل فاراداي في عام ١٨٣١؛ حيث استخدام أقراص نحاسية ومغناطيس، على شكل حدوة حصان لتوليد الكهرباء.

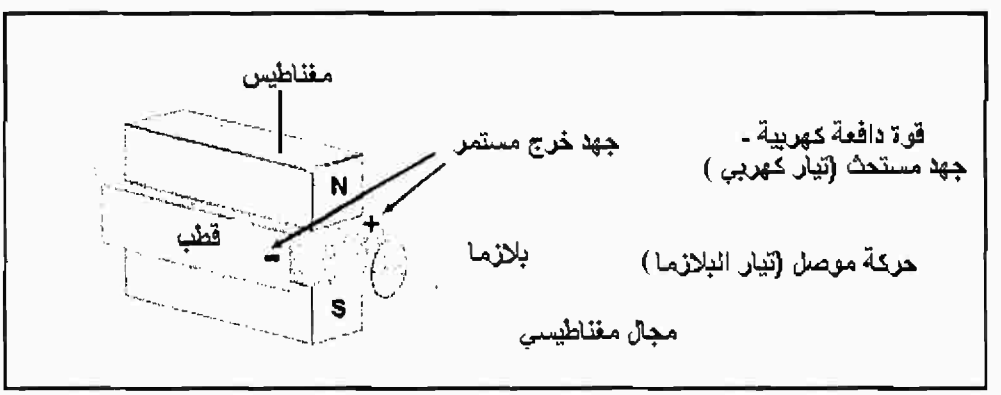
تحت ظروف الضغط العالي، يتم إنتاج الغاز الموصل كهربائيًا، من خلال حرق الوقود الأحفوري. تستخدم معظم نظم MHD الغاز الطبيعي والفحم أو الوقود الأحفوري. ومن ناحية أخرى، تستخدم الغازات الخاملة، مثل: الأرجون والهيليوم في بعض نظم MHD. يتم تمرير الغاز من خلال الفوهة بسرعة فائقة، تتراوح من ١٠٠٠ إلى ٢٠٠٠ متر في الثانية الواحدة. ولا تخلق مولدات MHD شحنة كهربائية، بل إنها كامنة في الموائع أو الغازات المؤينة. ويمكن زيادة التوصيلية للمائع، من خلال الاعتماد على أساليب مختلفة؛ فمثلاً إذا كان المائع هو غاز خامل؛ فمن الممكن إضافة كميات مناسبة من كربونات البوتاسيوم.

الغاز يدخل القناة أو المجرى؛ حيث يتم تطبيق مجال مغناطيسي قوي؛ بمساعدة مغناطيس فائق التوصيل. تصل كثافة القوة المغناطيسية أو المجال المغناطيسي داخل القناة إلى ما بين ٣-٥ تسلا. كلما مر الغاز عبر القناة، فإنه

يعاني قوة دافعة كهربية. كيف تنشأ هذه القوة؟ وفقًا لقانون فاراداي في تيار/جهد الحث الكهرومغناطيسي (القوة الدافعة الكهربية)، فإنها هي التي تستحث في سلك / ملف متى يكون هناك تغيير في وصلية الفيض المغناطيسي مع الملف. هنا، المغناطيسيات الكهربية ثابتة، ويتحرك المائع الموصل باستمرار.. وهذا يتسبب في توليد مجال كهربي.

كما ذكر، في وقت سابق، تتكون نظم MHD من قناة / مجرى، التي هي بمثابة جسر إلى الدائرة الخارجية، والتي ستسمح في نهاية المطاف بتدفق الكهرباء إلى الأحمال. السؤال الذي يطرح نفسه هنا: ما القطب؟ الأقطاب الكهربائية هي لوحات، وقضبان أو أسلاك، والتي تكون بمثابة موصل لتدفق الكهرباء، كما أنها بمثابة موصل إلى الدائرة الخارجية. هنا القناة بمثابة القطب. الدائرة الخارجية، موصلة بالقطب لإمدادات الطاقة الكهربائية، التي يتم نقلها إلى المسار المطلوب.

مولد الهيدروديناميكا المغناطيسية أو دينامو يحول الطاقة الحرارية أو الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية مباشرة. مولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية مختلفة عن المولدات الكهربائية التقليدية؛ من حيث إنها يمكن أن تعمل في درجات حرارة عالية دون أجزاء متحركة. وقد تطورت مولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية؛ لأن العادم من البلازما هو عبارة عن لهب، له القدرة على تسخين مراجل البخار لمحطة توليد الكهرباء. ولأن درجات الحرارة العالية لدى MHD تطورت؛ لتحتل المرتبة الاولى في زيادة كفاءة توليد الكهرباء، وخصوصًا عند حرق الفحم أو الغاز الطبيعي.



شكل (٤)

المفهوم الأساسي الذي يقوم عليه الدينامو الميكانيكي والمائعي سواء. ويستخدم دينامو المائع، مع ذلك، حركة المائع أو البلازما لتوليد التيارات، التي تولد الطاقة الكهربائية. ويستخدم الدينامو الميكانيكي، في المقابل، حركة الأجهزة الميكانيكية لإنجاز هذا. الفرق الفني بين مولد MHD ودينامو MHD، هو ملاحقة مسار الجسيمات المشحونة.

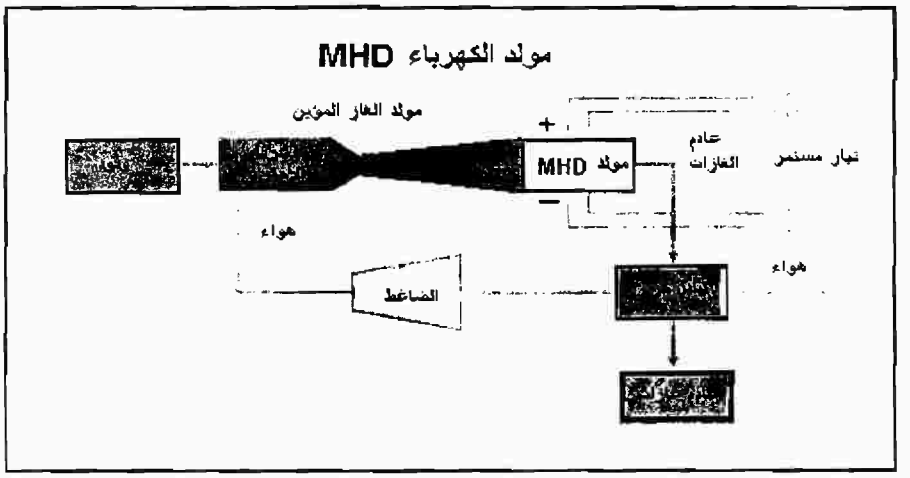
يحتاج نظام مولد MHD إلى درجة حرارة عالية لمصدر الغاز، الذي يمكن أن يكون مادة تبريد من مفاعل نووي أو أكثر. ومن المرجح أن يكون الارتفاع في درجة حرارة الغازات المحترقة ناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري، بما في ذلك الفحم، في غرفة الاحتراق. الرسم البياني أدناه يبين مكونات النظام المحتملة.

يقلل توسيع الفوهة من ضغط الغاز، وتزداد بالتالي سرعة البلازما (قانون برنولي)، من خلال مجرى مولد لزيادة انتاج الطاقة. ولسوء الحظ في الوقت نفسه، فإن انخفاض الضغط يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة البلازما (قانون جاي لوساك)، الذي يزيد أيضًا من مقاومة البلازما؛ ولذلك لا بد من إيجاد حل وسط بين برنولي وجاي لوساك. يتم استخدام حرارة العادم من مائع التشغيل في تدوير الضاغط؛ لزيادة معدل احتراق الوقود، ولكن سيتم إهدار كثير من الحرارة، مالم يتم استغلالها في عملية أخرى.

الشرط الرئيسي للنظام هو تخليق وإدارة غاز البلازما الموصل؛ لأن النظام يعتمد على وجود البلازما عالية التوصيل الكهربائي. موائع التشغيل المناسبة، هي: الغازات المشتقة من الاحتراق، والغازات النبيلة، والأبخرة المعدنية القلوية.

غاز البلازما

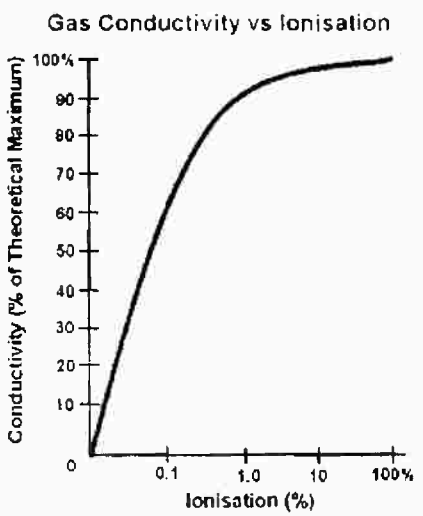
لتحقيق التوصيلية العالية، لا بد من تأين الغاز، وفصل الإلكترونات من الذرات أو الجزيئات تاركًا أيونات الشحنة الموجبة للغاز. تتدفق البلازما عبر المجال المغناطيسي بسرعة كبيرة. وفي بعض التصميمات، تفوق سرعتها سرعة الصوت، وتدفق الجسيمات المشحونة يوفر ما يلزم من الموصلات الكهربائية المتحركة.



شكل (٥)

أساليب تأين الغاز

هناك أساليب ملائمة ومختلفة لتأين الغاز، وجميعها تعتمد على نقل الطاقة الكافية للغاز. ويمكن تحقيق ذلك عن طريق التسخين، أو إشعاع الغاز بالأشعة السينية، أو أشعة جاما. كما يقترح استخدام غازات التبريد، مثل: الهليوم، وغاز ثاني أكسيد الكربون المستخدمة في بعض المفاعلات النووية كوقود البلازما؛ لتوليد الكهرباء مباشرة من مولد MHD، بدلاً من استخراج الطاقة الحرارية من الغاز، عن طريق مبادلات حرارية لينشئ البخار، الذي يقود مولدات التوربينات. غالبًا ما يتم إضافة بذور المواد، مثل: كربونات البوتاسيوم، أو السيزيوم بكميات صغيرة، وعادة حوالي ١٪ من إجمالي التدفق الجماعي لزيادة تأين وتحسين التوصيلية؛ لا سيما من احتراق غاز البلازما.



شكل (٦)

بما أن درجة حرارة البلازما تصل إلى 1000 درجة مئوية، فإن المجرى الحاوي للبلازما يجب أن يشيد من مواد، لها القدرة على مقاومة درجة الحرارة العالية، ويجب أن تكون الأقطاب موصلة بالإضافة إلى مقاومتها للحرارة.

المولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية هي، الآن، عملية لأنواع الوقود الأحفوري، ولكن قد تجاوزتها تكنولوجيات أخرى أقل تكلفة، مثل: دورات مجتمعة في توربينات الغاز، أو المنصهرة في خلايا الوقود كربونات العادم، مع ارتفاع درجات الحرارة البخار لتوربينات البخار. قيمة فريدة من MHD هو أنه يسمح بترقية أقدم قوة الوقود الأحفوري دورة واحدة مصنع لكفاءة عالية.

الدينامو الهيدروديناميكا المغناطيسية الطبيعي، موضع اهتمام للبحث في فيزياء البلازما، وذو أهمية كبيرة لمجتمعات الفيزياء الأرضية، والفيزياء الفلكية. ومن وجهة نظرهم أن الأرض دينامو MHD كروي، وأنه بمساعدة الجسيمات (البروتونات والألكترونات) المكونة للرياح الشمسية ينتج الشفق القطبي. واختلاف الطبقات الكهرومغناطيسية المشحونة الناتجة بواسطة تأثير الدينامو على المجال الجيومغناطيسي للأرضي، يؤدي إلى ظهور الشفق القطبي. وباستخراج القدرة من بلازما الرياح الشمسية، تتباطأ الجسيمات، ويتم سحبها على طول خطوط المجال، في عرض متألق فوق القطبين.

مبدأ

يصف قانون القوة للورنتز Lorentz تأثير الجسيمات المشحونة، التي تتحرك في مجال مغناطيسي ثابت، وأبسط صورة لهذا القانون تعطى بمعادلة المتجه:

$$\mathbf{F} = Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

حيث F هي القوة المؤثرة على الجسيم، Q هي شحنة الجسيم، وV، هو السرعة للجسيم، و B هو المجال المغناطيسي. والمتجه F عمودي على كلا من B و V طبقًا لقاعدة اليد اليمنى.

الشيء المهم هو أن نتذكر أن اتجاه القوة هو متجه عمودي على مستوى السرعة والمجال المغناطيسي. ومع ذلك، فإنه يتطلب تحليلاً متعمقًا في دراسة معادلة نافيير ستوكس (المدرجة في ديناميكية الموائع)، وقانون ماكسويل للكهرومغناطيسية. ومعادلات نافيير ستوكس والمعادلات التفاضلية، هي التي تحدد سرعة السائل، في أي لحظة معينة من الزمن.