



An Introduction to Magnetohydrodynamics

P. A. Davidson



الجزء الأول

أساسيات المجنيتو هيدرو دايناميك MHD

ديناميكا المائع المغناطيسي

لا شيء ممكن أن يكون حاسما لأي تطور أكثر من الثقة التامة والاعتماد على الرموز الرياضية، وللطالب فانه من المناسب فقط ان يأخذ أسهل كورس، ويعتبر المعادلات وليس الحقائق مثل الحقائق الفيزيائية.

العالم كلفن

من المفترض أن يكون لديك بعض المعلومات عن ميكانيكا الموائع والكهرومغناطيسية، ولكن من الممكن تطوير مهارتك في هذا الأمور من خلال المبادئ الأولية. كما إننا لا نفترض أن يكون لديك علم بموضوع التنسور، والذي سوف نستخدمه في الفصل السابع، حيث سوف نقدم موجز مبسط للتنسور. ولكن، سوف نعتمد كثيرا على تحليل المتجهات والقارئ عليه ان يكون متمكنا من حساب المتجهات.

المواضيع التي سوف نتناولها في الجزء الأول هي:

1. نظرة عامل حول ديناميكا المائع المغناطيسي MHD
2. المعادلات الخاصة بالالكتروديناميك
3. المعادلات الخاصة بميكانيكا الموائع
4. كينماتيكا MHD: انتشار وانسياب المجال المغناطيسي
5. الديناميكا عند مجال عدد رينولد المغناطيسي المنخفض
6. الديناميكا عند مجال عدد رينولد المغناطيسي المرتفع
7. اضطراب MHD عند أعداد رينولد المغناطيسية المنخفضة والمرتفعة



نقطة من الجدير الاشارة اليها في البداية. معادلات التحكم في MHD تتكون من قوانين نيوتن للحركة وقوانين الديناميكا الكهربائية electrodynamic. القارئ عليه ان يكون متأقلم مع تلك القوانين والظواهر المصاحبة لهما. ولهذا فان المعادلات الرياضية لـ MHD قد تبدو مرعبة، ولكن الفيزياء التي تمثلها ستكون واضحة. وهذا يجب ان يدفعنا للتحدي والتركيز لفهم التفاصيل الرياضية، لنتبع نصيحة العالم كلفن ونستمر بطرح الاسئلة كما قال: ماذا يحدث في الواقع؟

وتمشيا مع هذا المبدأ، سوف نبدأ، في الجزء 3.1، ليس مع كامل الـ MHD، ولكن بتجربة عملية بسيطة. وهذا يشمل مجال مغناطيسي ساكن عمودي على ساق موصل والذي بدوره ينزلق على امتداد سكتين موصلتين. هذه التجهيزات تستخدم بكثرة في مختبرات المدرسة لشرح وتوضيح قانون الحث لفارادي. ولكن، عندما نقوم بدراسة ديناميكية انزلاق الساق سوف نكتشف أمور أكثر من قانون فاردي. في الحقيقة، هذه التجربة البسيطة تشرح العديد من الظواهر الفيزيائية التي من الممكن ان نجدها في MHD. وهذا يعني على سبيل المثال عندما يتحرك وسط موصل في مجال مغناطيسي B فإنهما يتفاعلان بحيث تمنع الحركة النسبية للوسط والمجال المغناطيسي.

سوف نبدأ التحليل الأساسي في الفصلين الثاني والثالث، حيث سنقوم بوضع مجموعة من المعادلات التي تحكم MHD. هذه تشمل معادلات Navier-Stokes ومعادلات ماكسويل في صورة مبسطة حيث سيكون قانون جاوس مهمل وكذلك سنهمل تيار الإزاحة.

في الجزء الرابع سوف نعتبر الازدواج بين المجال المغناطيسي B والوسط. وبالأخص سوف ننظر لتأثير سرعة المائع u على المجال المغناطيسي بدون ان نهتم بمعرفة أصل السرعة أو التفاعل الخلفي لقوى لورنتز على المائع. وهنا سوف نستغني عن وصف معادلة Navier-Stokes لـ u، ونركز على دور u عند استخدام معادلات ماكسويل.



في النهاية سوف ندخل الديناميكا في الفصلين الخامس والسادس. سوف نبدأ في الفصل الخامس بالتعامل مع موصل ضعيف أو مائع يتحرك ببطء شديد بحيث ان المجال المغناطيسي يؤثر على حركة الموصل ولكن هناك تفاعل خلفي صغير على المجال المغناطيسي الخارجي. هذا نموذج MHD للمعدن المائع liquid metal. وفي الفصل السادس سوف نتعامل مع موصل قوي أو مائع يتحرك بسرعة كبيرة بحيث ان الاقتران بين المجال المغناطيسي B والسرعة u قوي جدا. وهنا سيكون مجال اهتمامنا مركز على نظرية الاستقرار والتي تعتبر ذات أهمية خاصة في مجال حصر البلازما واحتوائها، وفي نظرية الدينامو، وفي ظواهر عديدة في الفيزياء الجيولوجية. وفي الفصل السابع سوف ننهي الموضوع بمناقشة اضطرابات ال-MHD.

خلال الجزء الأول سوف نركز على الظواهر الفيزيائية أكثر من المعالجة الرياضية وعلى التطبيقات الهندسية. وذلك لأننا نشارك العالم رزفورد في وجهة نظره لأهمية الفيزياء وذلك في معرض تقديمه لطائفة متنوعة من الظواهر التي نعرفها باسم MHD.



1

نظرة عامة على MHD

إهمال الحدود بين فرعين من أفرع المعرفة غالباً ما يعود علينا بأقصى فائدة. والفائدة العظمى يمكن أن نحصل عليها من عندما تتلاقح العلوم وتتداخل مع بعضها البعض.

العالم رايليه (1884)

1.1 ما هي ديناميكية المائع المغناطيسي MHD؟

المجالات المغناطيسية تؤثر على الكثير من التدفقات والانسيابات الطبيعية والصناعية. فهي تستخدم بكثرة في صناعة السخانات الحرارية والمضخات وإثارة المعادن السائلة. هناك المجال المغناطيسي الأرضي والذي يعمل على إبقاء حركة الموائع في باطن الأرض وكذلك المجال المغناطيسي الشمسي الذي يولد البقع الشمسية واللهب الشمسي وأيضاً المجال المغناطيسي للمجرة والذي يؤثر على تكوين النجوم من السحب النجمية. دراسة هذه التدفقات والانسيابات يعرف باسم magnetohydrodynamics أي ديناميكية المائع المغناطيسي والذي يرمز لها بـ MHD. وعلم MHD يهتم بالتأثير المتبادل لتدفق المائع والمجالات المغناطيسية. يجب ان يكون المائع تحت الدراسة موصل كهربائي وغير ممغنط، والذي يقيدنا في حالة المعادن المائعة والغازات المتأينة (البلازما) والمحلل الكهربائي القوي.

التأثير المتبادل للمجال المغناطيسي B وسرعة التدفق u تنتج بصفة جزئية من قوانين فرادي وأمبير، وجزئياً لان قوة لورنتز تواجه بالجسم المار به التيار. سوف نناقش ونوضح بشيء من التفصيل شكل التأثير المتبادل في الفصول القادمة، ولكن ربما من المفيد الآن ان نذكر بدون إثبات طبيعة هذا التبادل. كذلك من المناسب، وبالرغم من ان ذلك اصطناعي، ان نفصل العملية إلى ثلاثة أجزاء.

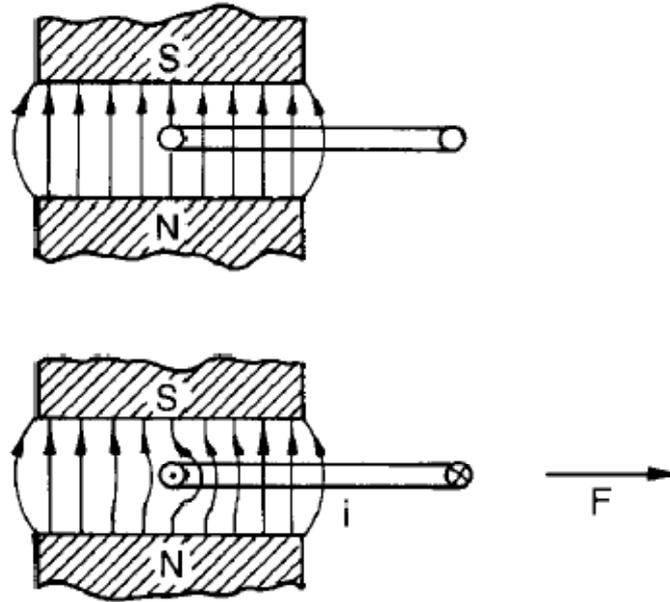


- (i) الحركة النسبية للمائع الموصل والمجال المغناطيسي يتسبب في تولد قوة دافعة كهربية $e.m.f$ (هي $|u \times B|$) نتيجة لقانون فارادي للحث. بصفة عامة، سوف تتولد تيارات كهربية مستحثة، وكثافة التيار الكهربائي هي $(u \times B) \cdot \sigma$ ، حيث σ هي الموصلية الكهربية.
- (ii) هذه التيارات المستحثة يجب، طبقاً لقانون أمبير، ان تولد مجالاً مغناطيسياً مستحثاً آخر. هذا المجال المغناطيسي يجمع المجال المغناطيسي الأصلي والتغير الذي يطرأ على المائع وعادة يظهر في سحب خطوط المجال المغناطيسي مع حركة المائع.
- (iii) المجال المغناطيسي المركب (الأصلي والمستحث) يتفاعل مع كثافة التيار المستحث، J ، وهذا يؤدي إلى تولد قوة لورنتز (لكل وحدة حجوم)، $J \times B$. هذا يؤثر على الموصل ويكون عادة موجه بحيث يمنع الحركة النسبية للمجال المغناطيسي والمائع.

لاحظ ان آخر تأثيرين لهما نتائج متشابهة. في كلا الحالتين فان الحركة النسبية للمائع والمجال تميل لان تقل. الموائع تسحب خطوط المجال المغناطيسي (التأثير (ii)) والمجالات المغناطيسية يمكن ان تسحب الموائع الموصلة (التأثير (iii)). وهذه حالة تجرد جزئي للحالتين الوسط والمجال المغناطيسي الذي يوصف بـ MHD.

هذه التأثيرات من المحتمل ان تكون مألوفاً في حالة الديناميكا الكهربية المعروفة. اعتبر حلقة من سلك تسحب بواسطة مجال مغناطيسي كما في الشكل 1.1. وكلما سحبت حلقة السلك إلى اليمين تتولد قوة دافعة كهربية $e.m.f$ تعطى بـ $|u \times B|$ والتي تعمل على توجيه التيار كما هو موضح في التأثير i. المجال المغناطيسي، المرتبط بالتيار الكهربائي المستحث يؤثر باضطراب على المجال المغناطيسي الأصلي، والنتيجة النهائية ان خطوط المجال المغناطيسي تبدو كأنها مسحوبة على امتداد السلك (التأثير (ii)).

كما ان التيار يسبب في زيادة قوة لورنتز $J \times B$ ، والذي يؤثر على السلك في اتجاه يعاكس اتجاه الحركة (التأثير (iii)). ولهذا من الضروري ان توفر القوة اللازمة لتحريك السلك. وباختصار، السلك يسحب خطوط المجال المغناطيسي في حين ان المجال المغناطيسي يستجيب برد فعل معاكس على السلك، ليضاد الحركة النسبية للاتنين.



شكل 1.1 التفاعل بين المجال المغناطيسي وحلقة السلك المتحرك

لنلقى الآن نظرة على التأثير (ii) بشيء من التفصيل. كما سنرى فيما بعد، المدى الذي تؤثر فيه سرعة التدفق على المجال المغناطيسي الخارجي يعتمد على حاصل ضرب (i) سرعة الحركة، (ii) ومقدار الموصلية للمائع، و (iii) وطول نطاق الحركة l . ومن الواضح انه في حالة المائع غير الموصل أو في حالة السرعة المهمة فانه لا يوجد هناك أي مجال مغناطيسي مستحث. وبالمقابل إذا كانت الموصلية σ والسرعة u لهما قيمة كبيرة، فان المجال المغناطيسي المستحث سوف يعمل على تعديل المجال المغناطيسي الخارجي. (على سبيل المثال السلك في الشكل 1.1 اذا كان غير جيد التوصيل للكهرباء أو يتحرك بسرعة بطيئة، فان التيار الحثي، والمجال المغناطيسي المصاحب سيكون ضعيف). والسبب في ان الطول l مهم ليس واضحا، ولكن من الممكن أن نتحقق من خلال المناقشة التالية. القوة الدافعة الكهربائية e.m.f. المتولدة بالحركة النسبية بين المجال الكهربائي الخارجي والوسط والتي هي من الرتبة $|u \times B|$ ومن قانون أوم فان كثافة التيار الكهربائي المستحث هي من الرتبة $\sigma(|u \times B|)$. وعلى كل حال فان كثافة التيار تنتشر على مسافة كبيرة من الممكن أن تولد مجال مغناطيسي عالي، في حين ان نفس كثافة التيار الكهربائي المنتشر على مسافة صغيرة ينتج عنها مجال مغناطيسي ضعيف. ولهذا فان حاصل ضرب σul يحدد النسبة بين المجال المغناطيسي المستحث



والمجال المغناطيسي الخارجي. في حالة عندما تؤول نهاية $\sigma u / \infty$ (في هذه الحالة يكون لدينا حالة تعرف باسم الموصل المثالية) فان المجال المغناطيسي المستحث والمجال الخارجي يكونا من نفس الرتبة. في هذه الحالات يكون سلوك المجال المغناطيسي المشترك كما لو كانا مثبتين في المائع. وبالمقابل، عندما تؤول $\sigma u / 0$ ، فان المجال المغناطيسي الخارجي يبقى نسبيا غير متأثرا. الـ MHD في علوم الفيزياء الفلكية تكون اقرب إلى الحالة الأولى، ليس لان موصلية البلازما عالية، ولكن بسبب اتساع طول النطاق l . ومن جهة أخرى فان MHD للمعادن المائعة، فهي تكون قريبة من الحالة الثانية حيث تكون سرعة التدفق u لا تؤثر على المجال B . ومع ذلك، من الضروري ان نركز على ان تأثير (iii) لازال قويا في المعادن المائعة، ولذلك فان المجال المغناطيسي الخارجي يؤثر بقوة على سرعة التدفق.

من المهم الآن ان نتحدث قليلا عن حالة المعادن المائعة بشيء من التفصيل. هذه الموائع لها موصلية عالية ($\sim 10^6 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$)، ولكن سرعتها بطيئة في حدود 1m/s . ونتيجة لهذا، فان كثافة التيار المستحث في اغلب الأحيان تكون قليلة في حدود بضعة أمبيرات لكل سنتيمتر مربع، والمجال المغناطيسي المستحث عادة ما يكون مهملا بالمقارنة مع المجال المغناطيسي الخارجي. لذلك فان حالة الاندماج بين المائع والمجال المغناطيسي ضئيلة جدا. ولكن، المجال المغناطيسي الخارجي غالبا ما يكون قويا بما فيه الكفاية لكي تكون قوة لورنتز $J \times B$ مسيطرة على حركة المائع. وهنا سوف نبدأ في التفكير في حالة الاقتران على إنها من طرف واحد وهو المجال المغناطيسي B يتحكم في سرعة المائع u من خلال قوة لورنتز، ولكن u لا تؤثر بشكل ملحوظ على المجال المغناطيسي الخارجي B . ولكن هناك بعض الاستثناءات. ربما أهم هذه الاستثناءات هو دينامو الأرض. حيث تكون حركة المعادن المائع في باطن الأرض ملتوية وممتدة ومكبدة للمجال المغناطيسي الأرضي، بما جعلها محافظة على استمرار العمليات الطبيعية بدون ان تضمحل أو تنتهي. ونطاق الطول الكبير هو الأهم هنا. بينا تكون كثافة التيارات الكهربائية المستحثة ضعيفة، لأنها منتشرة على مسافة كبيرة وتأثيرها المشترك يجب ان يحدث مجال مغناطيسي مستحث كافي.

وخلاصة ما سبق، فان التواجد المشترك بين المجال المغناطيسي والوسط يكون قويا في الفيزياء الفلكية وفي الفيزياء الجيولوجية، وضعيفا في الـ MHD لعلم التنقيب عن المعادن ومهملا في المحلل الكهربائي. ولكن تأثير المجال المغناطيسي B على سرعة المائع u مهمة في الحالات الأربعة.



2.1 مقدمة تاريخية مختصرة لـ MHD

القوانين المغناطيسية وتدفق المائع بالكاد كانت مكتشفة في القرن العشرين، وحتى أصبحت MHD من المواضيع المهمة في أواخر 1930 وفي بداية الأعوام 1940. والسبب في الغالب يعود إلى قلة الحوافز التشجيعية للمهندسين في القرن التاسع عشر لوجود تطبيقات عملية ممكنة ان توفرها الـ MHD. في حين ان هناك بعض التجارب التي أجريت من قبل علماء فيزيائيين في القرن التاسع عشر مثل فارادي (الذي حاول قياس فرق الجهد الكهربائي على جانبي نهر التايمز الناتج عن حركة الماء في المجال المغناطيسي للأرض)، هذا الموضوع بقي خافتا حتى القرن الحالي. ولكن بدأت الأمور تتغير، عندما لاحظ علماء الفيزياء الفلكية المجالات المغناطيسية والبلازما المنتشرة في كل مكان عبر الكون. وقد بلغ هذا الاهتمام ذروته في العام 1942 باكتشاف موجة ألفين *Alfven wave*، وهي ظاهرة خاصة لـ MHD ومهمة في علم الفيزياء الفلكية. (خط المجال المغناطيسي بإمكانه إرسال أمواج مستعرضة مثل أوتار الآلات الموسيقية). وفي نفس الوقت تقريبا تمكن علماء الفيزياء الجيولوجية من فهم مصدر المجال المغناطيسي للأرض والذي توقعوا ان يكون بسبب حركة الدينامو للمعادن المائعة في باطن الكرة الأرضية، هذه الفرضية وضعت في العام 1919 بواسطة العالم لارمور الذي قام بسلسلة من الأبحاث والتي استمرت حتى يومنا هذا.

ومن جهة أخرى فان علماء فيزياء البلازما اهتموا بـ MHD في الخمسينات من القرن العشرين كوسيلة للبحث للحصول على طاقة حرارية نووية اندماجية يمكن السيطرة عليها. لقد كان اهتمامهم بشكل خاص على استقرار البلازما المحصورة بواسطة المجالات المغناطيسية، وقد أحرزوا تقدما ملحوظا في تطوير نظرية الاستقرار.

تطوير MHD في مجال الهندسة كان أبطء بل انه لم يبدأ حتى أوائل الستينات من القرن العشرين. ولكن وجدت بعض الأعمال المبكرة بواسطة المهندس *J. Hartmann*، الذي اخترع مضخة كهرومغناطيسية في العام 1918. كذلك أجرى المهندس *Hartmann* دراسات نظرية وعملية على تدفق الزئبق في مجال مغناطيسي متجانس. وفي مقدمة ورقته العلمية وصف أبحاثه وملاحظاته.



الاختراع (يتحدث عن المضخة) يكون كما سوف نرى، ليس اختراعا عبقريا، ولكن مبدأ عمله يعتمد على استخدام أدوات معروفة لقياس شدة المجالات المغناطيسية. والجهاز لا يمثل مضخة ذات كفاءة عالية، فالكفاءة منخفضة جدا بسبب المقاومة الكبيرة للزئبق وكذلك بسبب مقاومة التوصيلات بين الالكترودات والزئبق. وبالرغم من كل هذا فان اهتمام كبير أعطي لهذه الآلة، والسبب يعود إلى التطبيقات العملية حيث الكفاءة ليست مهمة بالمقارنة مع استخداماته. وفي الواقع دراسة هذه المضخة كشف عن مجال بحثي جديد، وهو تدفق مائع موصل في مجال مغناطيسي، والاسم الذي أطلق على هذا المجال البحثي الجديد هو ديناميكا الزئبق Hg-dynamics.

قد لا نذكر الاسم ولكن من الممكن ان نعتبر ان Hartmann هو مؤسس MHD للمعادن المائعة، وبالطبع مصطلح تدفق Hartmann يستخدم لوصف تدفق أنبوب في مجال مغناطيسي. وبالرغم من ان Hartmann من أوائل الباحثين، إلا انه حتى مطلع الستينات من القرن العشرين بدأت MHD تستخدم من قبل المهندسين. التغيير الكبير جاء نتيجة لثلاثة اختراعات تكنولوجية هي:

- (i) مسبب التفاعل السريع الذي يستخدم سائل الصوديوم كمبرد وهذا يجب ضخه،
- (ii) السيطرة والتحكم في التفاعل الاندماج النووي والذي يتطلب حصر البلازما الساخنة وإبعادها عن أسطح المواد باستخدام القوى المغناطيسية،
- (iii) مولد الطاقة MHD، والذي يدفع الغاز المتأين خلال المجال المغناطيسي، والذي اعتقد انه من الممكن استخدامه للحصول على محطات طاقة عالية الكفاءة.

الاختراع الأخير اتضح بأنه غير عملي، وفشله كان فضيحة انتشرت بسرعة في الأوساط والمجتمعات العلمية. ولكن كنوع من الاهتمام أعلنت محطات الطاقة ان الأبحاث في مجال التنقيب عن المعادن باستخدام MHD قد توقفت. ولكن بعد عقدين من الزمن، استخدمت المجالات المغناطيسية لتسخين وضخ وتحريك ورفع المعادن المائعة في الصناعات Metallurgical. المفتاح الرئيسي هو قوة لورنتز التي توفر وسيلة للتحكم في تدفق الموائع بدون ان تتدخل فيه بطريقة مباشرة.



3.1 انواع الكهروديناميكا الـ MHD: تجربة بسيطة

الاختلاف الوحيد بين MHD والكهروديناميكا المعروفة هو درجة مائعية الموصل. هذه تجعل التفاعل بين u و B أكثر حساسية وأكثر صعوبة لقياسه وتقديره. وبالرغم من ذلك فإن الكثير من الخصائص المهمة لـ MHD مخبأة في الكهروديناميكا والتي من الممكن إظهارها بتجارب عملية بسيطة. إن الفهم والإدراك العميق لمبادئ الكهرومغناطيسية هو ما نحتاجه لفهم هذه الظواهر. في البداية سوف نقوم بمناقشة خصائص الـ MHD من خلال التجربة الموضحة أدناه والتي صممت من أجل توضيح الـ MHD.

1.3.1 بعض العوامل المهمة في الالكتروديناميك والـ MHD

دعنا نستخدم بعض الرموز الأساسية. لنفترض إن μ ثابت السماحية للفراغ، و σ الموصلية الكهربائية، و ρ كثافة المادة الموصلة، و l طول النطاق. العوامل الثلاثة المهمة في MHD هي:

$$\text{Magnetic Reynolds number, } R_m = \mu \sigma u l \quad (1.1)$$

$$\text{Alfvén velocity, } v_a = B / \sqrt{\rho \mu} \quad (1.2)$$

$$\text{Magnetic damping time, } \tau = [\sigma B^2 / \rho]^{-1} \quad (1.3)$$

أول هذه العوامل يمكن اعتباره بدون وحدات ويقاس الموصلية في حين إن العاملين الثاني والثالث لهما أبعاد سرعة وزمن على التوالي، كما يتضح ذلك من مسمياتهما.

الآن وبعد ان نوهنا على ان المجالات المغناطيسية تتصرف بشكل مختلف يعتمد ذلك على موصلية الوسط. فانه تبين لما في الواقع ان R_m وليس σ هي الأهم. حيث R_m كبيرة وخطوط المجال المغناطيسي تعمل مثل حزم مطاطية متجمدة في الوسط الموصل. هذا له نتيجتين، الأولى أن الفيض المغناطيسي المار خلال أي حلقة مادة قريبة (الحلقة عادة تتكون من جسيمات المادة) تتجه إلى ان تكون محافظة خلال حركة وهذا موضح في الشكل 1.1. وثانيا وكما سوف نرى، فان اضطرابات في الوسط تتجه إلى تكوين اهتزازات شبه



مرنة، حيث المجال المغناطيسي يزود الاهتزازات بقوة استرجاعية. وفي المائع، فإن هذه سوف تنتج أمواج ألفين *Alfven waves*، والتي يكون لها تردد $\omega \sim v_a/l$

عندما تكون R_m صغيرة، ومن جهة أخرى u لها قيمة صغيرة لتؤثر على المجال المغناطيسي B ، فإن المجال المغناطيسي المستحث سيكون مهملاً بالمقارنة مع المجال المغناطيسي الخارجي. ويسلك المجال المغناطيسي في هذه الحالة سلوك مختلف تماماً. وسوف نرى أن هذا متشنت بطبيعته، وليس مرناً، والحركة الميكانيكية المخددة تتحول إلى طاقة حركية بواسطة تشنت جول. ومقياس الزمن يصبح زمن الإخماد τ ويعطى بـ l/v_a .

كل هذه الأمور سوف نناقشها بالتفصيل في الفصول 4 و 5 و 6. والهدف من هذا الفصل هو توضيح أن التجارب المدرسية كافية لعرض هاذين النوعين من السلوك المختلف وتوضيح الأدوار العامة التي تلعبها العوامل R_m ، v_a ، و τ .

2.3.1 تذكير مختصر بقوانين الالكتروديناميكا

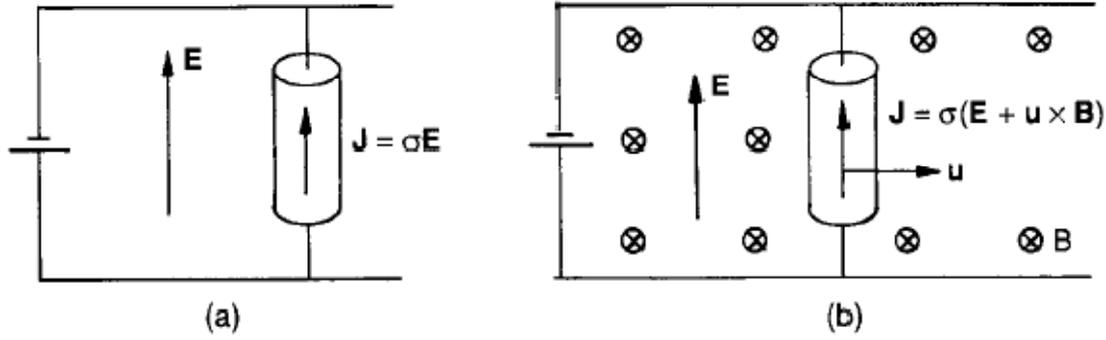
دعنا نبدأ بالتذكير بالقوانين الأساسية للكهرومغناطيسية (مزيد من التفاصيل حول هذه القوانين موضح في الفصل الثاني). القوانين التي تهمننا هنا هي قوانين أوم وفرادي وأمبيرير. وسوف نبدأ بقانون أوم (الشكل 2.1 (a)).

هذا قانون تجريبي بحيث أن الموصل الساكن، تكون كثافة التيار الكهربائي J تعطى بالعلاقة $J = \sigma E$ حيث E المجال الكهربائي. ونحن نفسر ذلك بأن كثافة التيار الكهربائي تتناسب طردياً مع قوة كولوم $f = qE$ والتي تؤثر على حاملات الشحنة الحرة، q مقدار شحنتها. وإذا كان الموصل يتحرك في مجال مغناطيسي بسرعة u ، فإن الشحنات الحرة سوف تتعرض لقوة إضافية هي $qu \times B$ وقانون أوم يصبح على النحو التالي:

$$J = \sigma(E + u \times B) \quad (1.4)$$



المقدار $E + u \times B$ ، عبارة عن القوة الكهرومغناطيسية لكل وحدة شحنة، وتظهر بصورة متكررة في الالكتروديناميك ومن المناسب ان نقوم بإعطائها رمز معين. وسوف نستخدم



الشكل 2.1 (i) قانون اوم في حالة (a) السكون وفي حالة (b) حركة الموصل

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} = \mathbf{f}/q$$

بشكل رسمي، E_r عبارة عن المجال الكهربائي المقاس في محاور الإسناد المتحركة بسرعة u بالنسبة إلى محاور الإسناد الساكنة (أي تلك التي في المختبر) انظر الفصل الثاني. ولكن، من اجل الهدف الحالي فانه من المفيد أن نفكر في أن E_r على إنها f/q . وبعض المؤلفين يشير إلى E_r على إنها المجال الكهربائي الفعال *effective electric field*. وبالعودة إلى E_r فان المعادلة (4.1) تصبح $J = \sigma E_r$.

قانون فاردي (الشكل 2.1 (ii)) يخبرنا عن القوة الدافعة الكهربائية e.m.f والتي تتولد في الموصل كنتيجة لـ: (i) التغير في المجال المغناطيسي بالنسبة للزمن، أو (ii) حركة الموصل في مجال مغناطيسي. وفي كلا الحالتين فان قانون فاردي يكتب على النحو التالي:

$$\text{emf} = \oint_C \mathbf{E}_r \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.5)$$

حيث C هنا تشير إلى منحنى مغلق يتكون من عناصر خطية صغيرة $d\mathbf{l}$. المنحنى يمكن ان يكون ثابت في الفراغ، أو متحرك مع المادة الموصلة. S هي سطح يمر في C . (نحن نستخدم قاعدة البريمة لتحديد الاتجاه

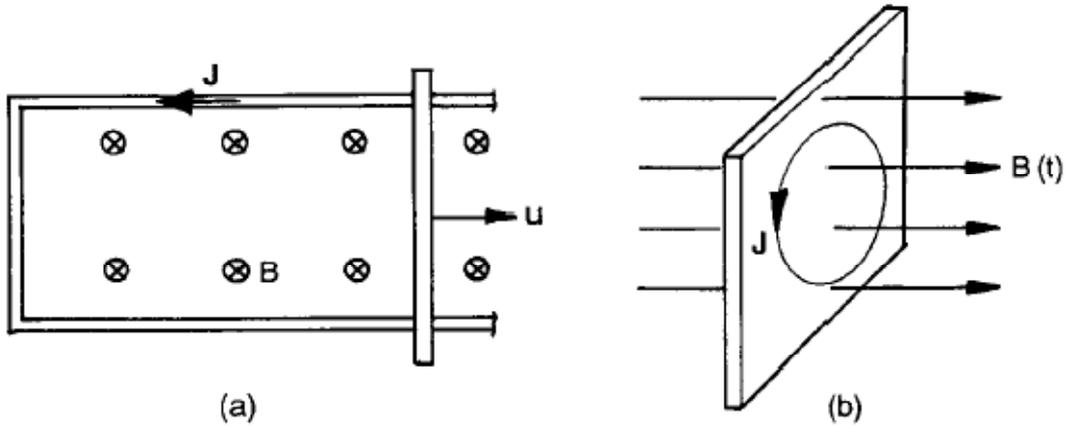


الموجب لكل من dl و dS .) الرمز r في E_r يشير إلى ضرورة استخدام المجال الكهربائي الفعال لكل عنصر طول dl :

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (1.6)$$

حيث E ، و u ، و B تقاس في المختبر و u هي سرعة العنصر dl .

في الجزء التالي، سوف نحتاج إلى قانون أمبير (الشكل 3.1). هذا يخبرنا عن المجال المغناطيسي المرتبط بتوزيع محدد لكثافة التيار J . وإذا كانت C عبارة عن منحنى مغلق في الفراغ، و S أي سطح يمر بالمنحنى فان القانون ينص على



الشكل 3.1 (ii) قانون فارادي (a) القوة الدافعة الكهربائية e.m.f الناتجة عن حركة الموصل، (b) القوة الدافعة الكهربائية e.m.f الناتجة عن التغير في المجال المغناطيسي مع الزمن.

تمت الترجمة في

المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

2009-6-6