الفصل الثاني: النواقل المتوازنة

1- تعريف النواقل المتوازنة

الناقل الكهربائي هو كل جسم يمكن لحاملات الشحنة أن تنتقل بداخله بحرية. ونقول عن ناقل أنه في حالة توازن كهرو ساكن إذا كانت كل الشحنات المتواجدة بداخله ساكنة (محصلة القوى الكهرو ساكنه المطبقة على كل شحنة q معدومة)

2- خواص الناقل المتوازن:

- **الحقل داخل الناقل المتزن معدوم**

بما ان الشحنات داخل الناقل المتزن ساكنة فهي لا تخضع لأية قوة وهذا يعني أن الحقل الكهرو ساكن داخل الناقل المتزن معدوم

$$\vec{F} = Q\vec{E} = \vec{0} \Rightarrow \vec{E} = \vec{0}$$

- **الشحنة Q داخل الناقل المتزن معدومة**

وهذا انطلاقا من نظرية غوص حيث:

$$\vec{E} = \vec{0} \Rightarrow \int_{S_G} \vec{E}\,\overrightarrow{ds} = \vec{0} \Rightarrow \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0} = 0$$

$$\Rightarrow \quad Q_{int} = 0$$

حيث S_G يمكن أن يكون أي سطح داخل الناقل

وعليه يتم توزيع شحنة الناقل Q على السطح لأنه لا يمكن أن تكون في الداخل.

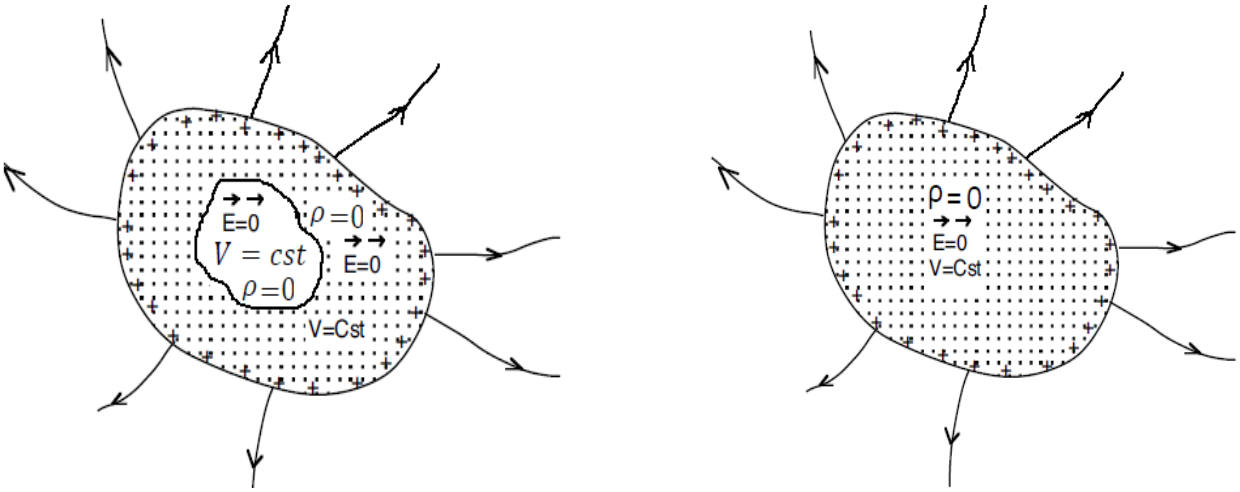
- **الكمون ثابت في كل نقطة من الناقل**

$$dV = -\vec{E}\,\overrightarrow{dl} = 0 \quad \Rightarrow \quad V = C$$

يشكل الناقل حجما لتساوي الكمون والسطح الخارجي للناقل هو سطح تساوي الكمون

- **يتعامد شعاع الحقل الكهربائي مع سطح الناقل المتزن**

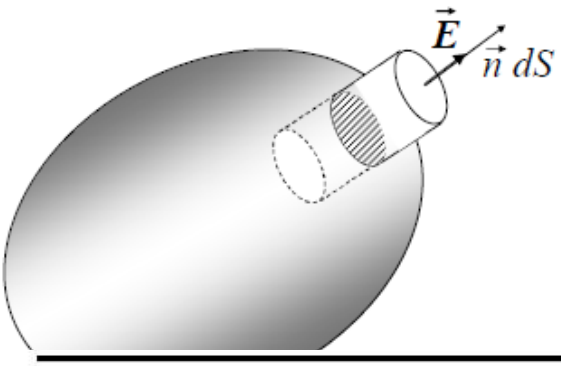
بما ان سطح الناقل يمثل سطح تساوي الكمون فإن شعاع الحقل الكهربائي يتعامد مع سطح الناقل المتوازن أي يكون ناظميا على سطحه الخارجي



الخواص السابقة للناقل تبقى صحيحة من أجل ناقل مجوف، حيث الحقل معدوم في الناقل و في التجويف الذي يشكل حجم تساوي الكمون ويتم توزيع شحنة الناقل Q على السطح بكثافة سطحية S موزعة على سمك مكون من بضع طبقات من الذرات.

3- الحقل الكهربائي بالجوار المباشر لناقل متوازن:

عبارته يمكن ايجادها باستعمال نظرية غوص حيث نختار سطح غوص اسطوانة مغلقة متناهية الصغر نصفها خارج الناقل ونصفها الآخر داخله بحيث يكون محورها ناظميا على سطح الناقل كما هو مبين في الشكل



يكون التدفق عبر السطح الجانبي للأسطوانة معدوما لأن $\vec{E} \perp \vec{dS}$

وكذلك عبر السطح الداخلي لأن الحقل داخل الناقل معدوم.

و بتطبيق نظرية غوص نجد :

$$E.S = \frac{\sigma.S}{\varepsilon_0}$$

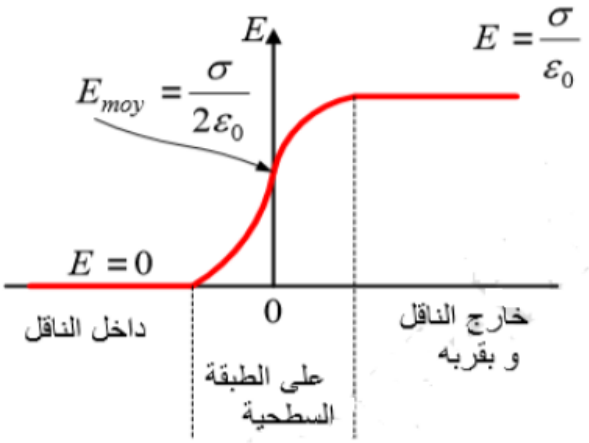
حيث σ هي الكثافة السطحية المحلية للشحنة يعطى الحقل الكهرو ساكن بالجوار المباشر للناقل بالعبارات التالية:

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}\vec{n}$$

حيث $\vec{n}$ هو شعاع الوحدة الناظمي عند كل نقطة على سطح الناقل والمتجه نحو الخارج.

المعادلة السابقة تعطي العلاقة بين الحقل الكهربائي في نقطة M خارج الناقل بالجوار المباشر منه، بينما الحقل داخل الناقل المعدوم. أما شدة الحقل على السطح مباشرة فهي متوسط الحقلين الداخلي $E_{int} = 0$ والخارجي E_V أي:

$$E_{moy} = \frac{E_{int} + E_V}{2} = \frac{0 + E_V}{2} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$



تغير الحقل الكهربائي عند عبور سطح الناقل

4- الضغط الكهرو ساكن:

تخضع كل شحنة من سطح الناقل لقوة طرد تطبقها الشحنات الأخرى التي تكون من نفس الطبيعة مما يولد الضغط الكهروستاتيكي أو القوة الكهروستاتيكية المطبقة على وحدة السطح. ولحساب الضغط الكهروستاتيكي نحسب أولا القوة $\mathrm{d}\vec{\mathrm{F}}$ المطبقة على شحنة عنصرية $\mathrm{d}q$ محتواة في سطح عنصري dS

فانطلاقا من عبارة الحقل المتوسط داخل الطبقة السطحية للناقل لدينا:

$$\mathrm{d}\vec{\mathrm{F}} = \mathrm{d}q \cdot \vec{\mathrm{E}}_m = \sigma \mathrm{dS} \cdot \frac{\sigma}{2\epsilon_0}\vec{n} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} \cdot \mathrm{dS}\ \vec{n}$$

تتجه القوة المطبقة على السطح نحو خارج الناقل مهما كانت طبيعة الكثافة المحلية σ

يعطي الضغط الكهروستاتيكي عند أي نقطة من سطح ناقل بالعبارة:

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{dF}}{\mathrm{dS}} = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}$$

ملاحظة: يتعلق الضغط ستاتيكي فقط بالكثافة السطحية المحلية لشحنه الناقل.

5- قدرة السطوح الحادة:

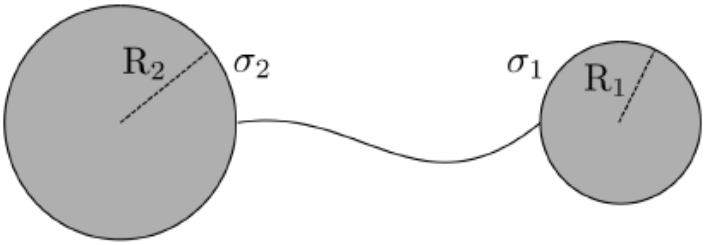
بصفة عامة، لا تكون شحنة الناقل موزعة بانتظام على سطحه ولكنها تميل الى التكثف على السطوح التي يكون نصف قطر انحنائها صغيرا (السطوح الحادة أو المدببة). تكون الكثافة المحلية على السطوح الحادة كبيرة ويكون الحقل الكهروستاتيكي الناتج بجوارها شديدا.

لتوضيح قدرة السطوح الحادة نقترح التطبيق التالي:

نحضر كرتين ناقلتين نصفى قطريهما R_1 و R_2 ونبعدهما عن بعضهما البعض بحيث لا يكون التأثير الكهربائي بينهما ممكنا ثم نصلهما ببعضهما البعض بواسطة سلك ناقل كما في الشكل لتشكل

الكرتان مع السلك بعد التوازن ناقلا واحدا كمونه ثابت V. المطلوب قارن بين كثافتي شحنتي الكرتين بعد التوازن الكهروستاتيكي وماذا تستنتج؟

نفرض أن الكرتين تكتسبان بعد التوصيل شحنتين جديدتين Q'_1 و Q'_2.



باستعمال عبارة كمون كرة ناقلة وباعتبار أن الكرتين تشكلان مع السلك بعد التوازن ناقلا واحدا متساوي الكمون فان:

$$\frac{KQ'_1}{R_1} = \frac{KQ'_2}{R_2}$$

بما ان توزيع الشحنة في ناقل المتوازن يكون سطحيا وباعتباره منتظما بانتظام السطح فإن:

$$Q'_2 = \sigma_2(4\pi R_2^2) \text{ و } Q'_1 = \sigma_1(4\pi R_1^2)$$

بتعويض عبارتي الشحنتين في المعادلة نصل الى العلاقة التي تربط كثافتي توزيع الشحنة في الكرتين حيث:

$$\sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2 \Rightarrow \sigma_1 = \frac{R_2}{R_1}\sigma_2$$

اذا فرضنا ان: $R_1 < R_2$ فاننا نجد: $\sigma_1 > \sigma_2$

نتيجة: تميل شحنة الناقل أكثر إلى التراكم على السطوح التي يكون نصف قطر انحنائها صغيرا وتسمى الظاهرة قدرة السطوح الحادة. إن هذه النتيجة مهمة جدا في العديد من التقنيات التكنولوجية مثلا: عمليات تفريغ الهواء كواقيات الصواعق ذات الرؤوس الحادة، وأيضا في الأطراف المعدنية الحادة المشدودة بأجنحة الطائرات.

6- السعة الكهربائية الذاتية لناقل: يتناسب الكمون الكهربائي طرديا مع الشحنة الكهربائية التي تنشئه وبصفة عامة تعطى شحنة ناقل المعزول بدلالة كمونه بالعلاقة التالية:

$$Q = C.V$$

حيث يسمى ثابت التناسب C السعة الذاتية للناقل وهي مقدار يتعلق فقط بشكله.

وحدات قياس السعة الكهربائية:

تقاس السعة الكهربائية في النظام الدولي بالفراد (Farad) ورمزه (F) ويعرف على أنه سعة ناقل شحنته 1C وكومونه 1V.

يعتبر الفراد سعة كبيرة جدا وتستعمل عادة أجزاؤه وهي:

ميكرو فراد: $1\mu F = 1 \times 10^{-6} F$

نانو فراد: $1nF = 1 \times 10^{-9} F$

بيكو فراد: $1pF = 1 \times 10^{-12} F$

مثال: حساب السعة الذاتية لكرة ناقلة ومعزولة

لتكن كرة ناقلة نصف قطرها R ومشحونة بشحنة Q أي:

$$V = \frac{kq}{R} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R} \Rightarrow C = \frac{q}{V} = 4\pi\varepsilon_0 R$$

نلاحظ من خلال هذا المثال أن سعة هذا الناقل تتعلق فقط بنصف قطر الناقل الكروي، أي بالشكل الهندسي فقط كما سبق الذكر.

7- الطاقة الداخلية لناقل مشحون ومعزول:

هي عبارة عن العمل اللازم بذله لشحن الناقل وهي أيضا تمثل عمل القوى الكهرساكنة أثناء تفريغ الناقل: لدينا ابتداء من الطاقة الكامنة العنصرية:

$$dE_P = Vdq \Rightarrow \left.\begin{array}{l} E_P = \int_0^Q V\,dq \\ V = \frac{q}{C} \end{array}\right\} \Rightarrow E_P = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

يمكن ايضا تعبير عن الطاقة الكامنة كما يلي:

$$E_P = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}qV$$

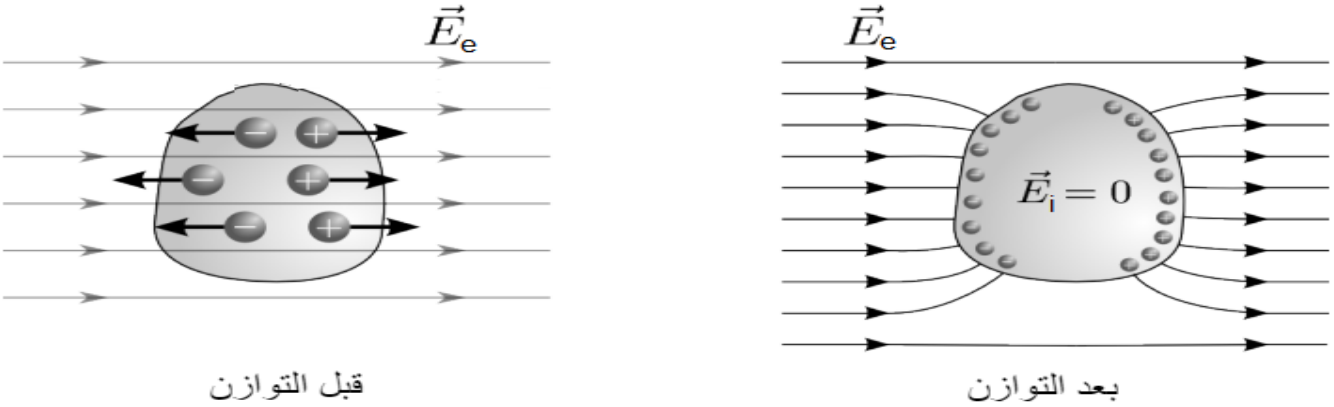
7- - التأثير المتبادل بين النواقل:

7. 1- استقطاب ناقل في وجود حقل كهرو ساكن خارجي:

عند وضع ناقل في حقل كهرو ساكن خارجي تتحرك الشحنات الحرة نتيجة للقوة الكهربائية وتتجمع في جهة من سطح الناقل وتظهر شحنات معاكسة لها على الجهة المقابلة (تتحرك الشحنات الموجبة في جهة الحقل، والشحنات السالبة في الجهة المعاكسة). يحدث استقطاب للناقل، مما يؤدي إلى $\vec{E}_i$، حقل كهرو ساكن داخلي يكون معاكسا للحقل الخارجي $\vec{E}_e$. ويتزايد نقل الشحنات حتى نصل إلى حالة التوازن عندما يصبح الحقل الكلي داخل الناقل معدوما

$$\vec{E}_{ti} = \vec{E}_i + \vec{E}_e = \vec{0} \Rightarrow \vec{E}_i = -\vec{E}_e$$

يبقى المجموع الجبري للشحنات ثابتا مساويا مقدار الشحنة التي كان يمتلكها الناقل قبل التأثير لذا فالذي تغير هو توزيع الشحنات فقط حيث يكل طرفاه قطبين (+) و (-). ويتغير تبعا لذلك الكمون نتيجة للتوزيع الجديد.



بعد التوازن قبل التوازن

بعد حدوث التوازن الجديد يكون للناقل نفس خصائص الناقل المتوازن.

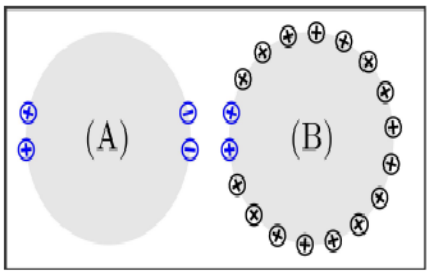
7. 2- التأثير المتبادل بين ناقلين:

◄ التأثير الجزئي:

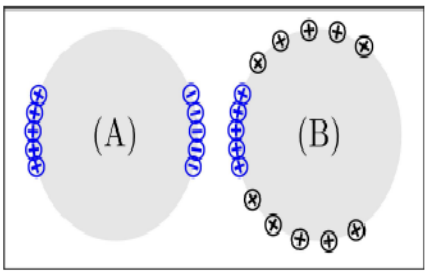
ندرس سلوك ناقل A (متعادل مثلا) عندما يوضع بجوار ناقل آخر B مشحون (موجب مثلا):

- في البداية، يؤثر الناقل المشحون على الشحنات الحرة للناقل المتعادل فتظهر على طرف الناقل A المقابل للناقل B شحنات سالبة (معاكسة لطبيعة شحنة الناقل B) وتظهر على طرفه الآخر شحنات موجبة (من نفس طبيعة شحنة الناقل B) وتسمى هذه المرحلة بداية تأثيرB على A.
- تؤثر الشحنات الجديدة التي تظهر على طرف الناقل A بدورها على الناقل B فتزداد كثافة الشحنة الموجبة على طرفه المقابل للناقل A وتسمى هذه الظاهرة بالتأثير الرجعي للناقل A على الناقل B.

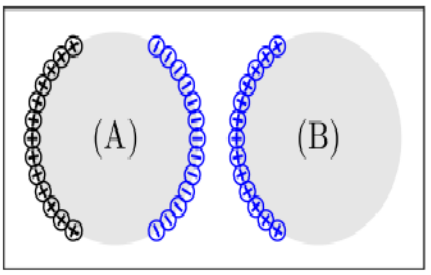
- تستمر حركة الشحنات في الناقلين نتيجة التأثير والتأثير الرجعي بينهما إلى أن يتحقق التوازن الكهرو ساكن للجملة عندما يصبح الحقل الكهربائي داخل كل من الناقلين معدوما وتسمى هذه الظاهرة بالتأثيرالجزئي المتبادل بين الناقلين لأن جزءا فقط من شحنتيهما يكون متفاعلا وتكون شحنتا الطرفين المتقابلين للناقلين من طبيعتين مختلفتين.



الشكل -أ-



الشكل -ب-



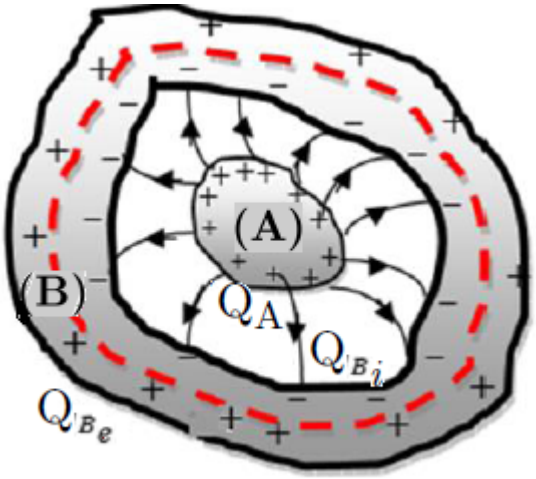
الشكل - جـ -

إن التأثير الموصوف سابقا يدعى جزئيا حيث تصل فقط بعض خطوط الحقل الصادرة عن B إلى الناقل A.

إذا وصل الناقل A بالأرض فإن شحناته الموجبة ستتسرب إليها ويشكل معها ناقلا وحيدا كمونه معدوم V=0.

◄ التأثير الكلي:

يكون التأثير المتبادل كليا إذا كانت كل الخطوط الصادرة عن الناقل الأول تصل الى الناقل الثاني، ولا يتحقق ذلك إلا إذا كان الناقل الثاني يحيط تماما بالناقل الأول كما هو مبين بالشكل.



ينشئ الناقل A المشحون بشحنة Q_A حقلا كهربائيا يؤثر في الناقل B فتتحرض على وجهيه شحنات $Q_{B\,i}$ على وجهه الداخلي و $Q_{B\,e}$ على وجهه الخارجي.

باستخدام نظرية غوص على سطح داخل الناقل B:

$$\mathrm{E} = 0 \Rightarrow q_{int} = \mathrm{Q_A} + \mathrm{Q}_i = 0 \Rightarrow \mathrm{Q}_i = -\mathrm{Q_A}$$

وتحسب شحنة السطح الخارجي بتطبيق مبدأ انحفاظ الشحنة للجملة أو للناقل الأجوف كالتالي:

$$\mathrm{Q_B} = \mathrm{Q}_i + \mathrm{Q}_e \Rightarrow \mathrm{Q}_e = \mathrm{Q_B} - \mathrm{Q}_i = \mathrm{Q_B} + \mathrm{Q_A}$$

- ❖ لا يحدث التفاعل الكلي إلا إذا كان الناقل الداخلي A مشحونا.
- ❖ إذا كان الناقل الأجوف B متعادلا $(\mathrm{Q_B} = 0)$ تكون شحنة سطحه الخارجي

$$\mathrm{Q}_e = -\mathrm{Q}_i = \mathrm{Q_A}$$

- ❖ بعد تحقق التوازن الكهروساكن للناقلين يكون لكل منهما نفس خصائص الناقل المعزول إلا أن شحنة الناقل الأجوف تكون موزعة على سطحه الداخلي والخارجي.