النواقـــل المتوازنـــة

1 - مقدمة :

في حجم ما من المادة، يمكن فصل الشحنات إلى نوعين: الشحنات الثابتة، ولها حركة اهتزازية حول موضع معين، والشحنات المتنقلة (أو الجوالة) التي يمكنها التحرك داخل المادة وتعرف **بالحوامل.** ففي المواد البلورية مثلا؛ يتشكل النوع الأول من أيونات (شوارد) تحتل بشكل دوري عقد الشبكة البلورية، بينما يتشكل النوع الثاني من إلكترونات أنتجتها عملية التأين، وهي ليست مرتبطة بأية ذرة بذاتها، بل هي قادرة على التنقل في جميع أنحاء الشبكة، وهي المعروفة **بإلكترونات النقل** أو **الإلكترونات الحرة.**
من هنا نميز بين **العوازل،** التي تحتل شحناتها مواضع محددة (شحنات محلية)، وبين **النواقل** التي تتوفر على عدد كبير من الحوامل القادرة على الحركة تحت تأثير حقل كهربائي ما.

تتغير خواص الجسم بتغير الشروط الفيزيائية؛ فالرطوبة أو ارتفاع درجة الحرارة أو الضغط ... قد يحول العازل إلى ناقل.

في الكهرباء الساكنة يعد عازلا نموذجيا كل جسم تظل شحناته ساكنة طيلة مدة التجربة. ومن أمثلته: الهواء الجاف غير المتشرد، المطاط، الزجاج، اللدائن،...، كما يعد ناقلا كل جسم شحناته على قدر كاف من الحركة يمكنه بلوغ توازنه الكهراكدي بسرعة. ومن أمثلته: الماء، جسم الإنسان، الأرض...

2 - تعريف النواقل المتزنة

الناقل الكهربائي (الموصل) هو كل جسم يمكن لحاملات الشحنة التحرك بداخله بحرية الناقل الكهربائي (الموصل) هو كل جسم يمكن لحاملات الشحنة التحرك بداخله بحرية

3 - خواص النواقل المتزنة

أ) بما أن الشحنات داخل الناقل المتزن ساكنة، فهي لا تخضع لأية قوة، و هذا يعني أن **الحقل الكهروساكن داخل الناقل المتزن معدوم :**

$$\vec{F} = q.\vec{E} = 0 \qquad \Rightarrow \boxed{\vec{E} = 0}$$

ب) من العلاقة

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V \qquad \Rightarrow dV = -\vec{E}.d\vec{l} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{V = Cte}$$

هذا يعني أن **الكمون ثابت** في كل نقطة داخل الناقل المتزن، ومنه **فالسطح الخارجي للناقل هو سطح تساوي الكمون.**

ج) بما أن السطح الخارجي للناقل هو سطح تساوي الكمون فإن: **شعاع الحقل الكهربائي يتعامد مع سطح الناقل المتزن**

د) $$\oiint \vec{E}.d\vec{S} = \frac{\sum Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} = \frac{\iiint \rho.dV}{\varepsilon_0} = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\rho = 0}$$

أي أن : **الشحنة داخل الناقل معدومة وتتموضع على سطح الناقل .**

هذه النتيجة تعني أنه في كل عنصر للحجم سوف توجد شحنات موجبة مساوية للشحنات السالبة بحيث الشحنة داخل الناقل معدومة.

فللشحنات الحرة الكلية تتوزع على سطح يشغل سمكا مكونا من بضعة طبقات من الذرات(**فشحنة الناقل لا تكون إلا سطحية بكثافة سطحية σ**). الشحنات الكهربائية المتحركة تتراكم على السطح حتى يصبح الحقل الذي تنتجه مساويا للحقل الخارجي المطبق على هذا السطح مما يؤدي إلى حالة توا ز ن

4 - الحقل بالجوار المباشر لناقل متزن : نظرية *Coulomb*

سطح الناقل هو سطح تساوي الكمون فخطوط الحقل عمودية على سطح الناقل.
عند نقطة ***M*** قريبة جدا من سطح الناقل الحقل $\vec{E}$ عمودي على ***S***. نعتبر حول ***M*** عنصر سطح ***dS*** موازي لسطح الناقل.
أنبوب الحقل المرتكز على ***dS*** يقطع على الناقل سطحا مساويا ***dS*** و يحمل شحنة: $\sigma . dS$.
نشكل سطح غوص مكون من ***dS*** . فحسب غوص يمكن أن نكتب:

$$\oiint \vec{E}.d\vec{S} = \frac{\sum Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

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

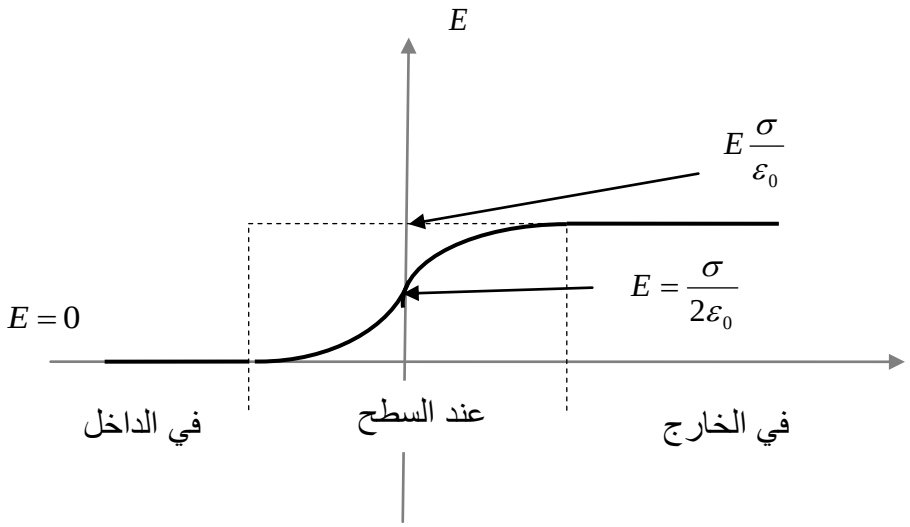
$$\boxed{E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$$

إذا كان $\vec{u}_N$ شعاع الوحدة على السطح الموجه نحو الخارج، فيمكن أن نكتب:

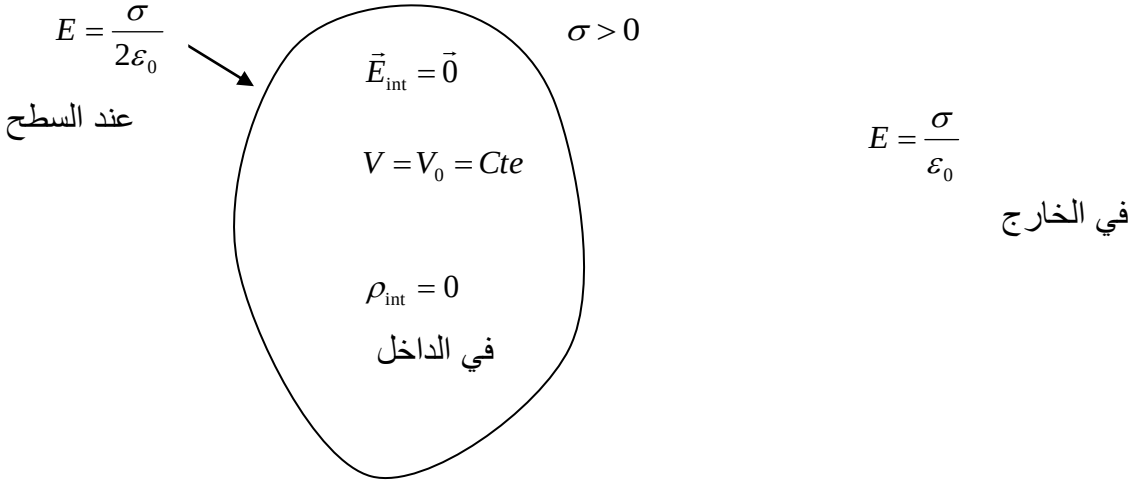
$$\boxed{\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\vec{u}_N}$$

قيمة الحقل في نقطة مجاورة للسطح هي $\frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ بينما في الداخل فهي معدومة، أما على السطح فالحقل يأخذ قيمة متوسطة $\boxed{E_{moy} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}}$

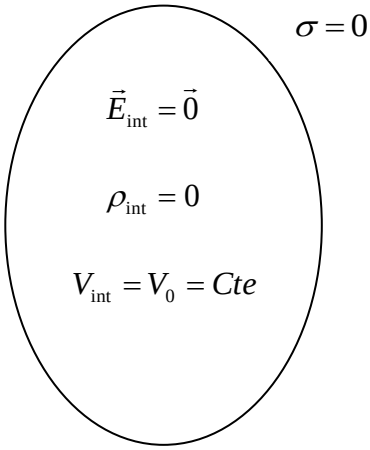
فعند عبور السطح يتغير الحقل وفقا للشكل التالي:



خلاصة : يبن الشكل خصائص الناقل المتزن



أما بالنسبة االناقل المعتدل فإن عند السطح $\sigma=0$ و عليه فالحقل على السطح و خارج الناقل معدوم



5 - الضغط الكهروساكن

الشحنة ***dq*** المحمولة بعنصر السطح **dS** من سطح الناقل يمكن اعتبارها خاملة واقعة في الحقل E_2 الناتجة عن الشحن الأخرى، و منه هذه الشحنة خاضعة لقوة كهربائية: أي : $df = dq.E_2$

$$df = dq.E_2 = \sigma.dS\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\vec{u}_N = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}dS.\vec{u}_N = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}d\vec{S}$$

نلاحظ أنه مهما تكون إشارة σ هذه القوة العمودية على الناقل تكون دوما موجهة نحو الخارج.

من العلاقة السابقة نجد أن الضغط الكهروساكن المعرف بأنه القوة بالنسبة لوحدة السطح:

$$\boxed{P_e = \frac{d\vec{f}}{d\vec{S}} = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}}$$

من جهة أخرى فأن $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \Rightarrow \sigma = E.\varepsilon_0$ و منه $\boxed{P_e = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0.E^2}{2}}$

وحدته في النظام الدولي : البسكال ***Pa***

نلاحظ أن الضغط الكهروساكن مقدار سلمي و موجب دوما و يمكن اعتباره بمثابة القوة التي بإمكانها نزع الشحنات من الناقل.

مثال:

الضغط الكهروساكن عند نقطة من سطح ناقل، الذي يسود بجواره حقل قيمته $10\ kV.m^{-1}$

$$P_e = \frac{\varepsilon_0.E^2}{2} = \frac{\left(10^4\right)^2}{72\pi.10^9} = \frac{1}{720\pi} \approx 4{,}4\times10^4\,Pa$$

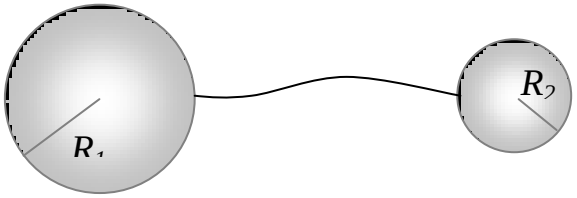
ضغط ضعيف بالمقارنة مع الضغط الجوي $P_0 = 10^5\,Pa$

- في الحالة العامة هذه القوى ضعيفة وغير كافية لنزع الشحن من السطح

6 - قدرة السطوح الحادة *Pouvoir des pointes*

يتعلق توزيع الشحنة على سطح الناقل بشكله الهندسي؛ بحيث تكون كثافتها على المناطق الحادة (التي يكون قطر انحنائها صغير) أعلا من كثافتها على المناطق المقعرة، فهي تتعلق بتقوس السطح.

لتوضيح ذلك، نعتبر ناقلين كرويين مشحونين، وموصولين ببعضهما بواسطة سلك ناقل رفيع، ولنفرض $R_2 < R_1$. فعند التوازن تغدو الجملة ناقلا وحيدا كمونه ثابت، وعلى الخصوص على سطحي الكرتين:



$$V_1 = V_2 \quad \Leftrightarrow \quad k\frac{q_1}{R_1} = k\frac{q_2}{R_2}$$

$$\frac{\sigma_1.4\pi.R_1^2}{R_1} = \frac{\sigma_2.4\pi.R_2^2}{R_2} \qquad \Rightarrow \qquad \sigma_1.R_1 = \sigma_2.R_2$$

أو:

$$\boxed{\sigma_2 = \frac{R_1}{R_2}\sigma_1 > \sigma_1}$$

أي أن **الشحنات تميل للتراكم على السطوح الحادة.**

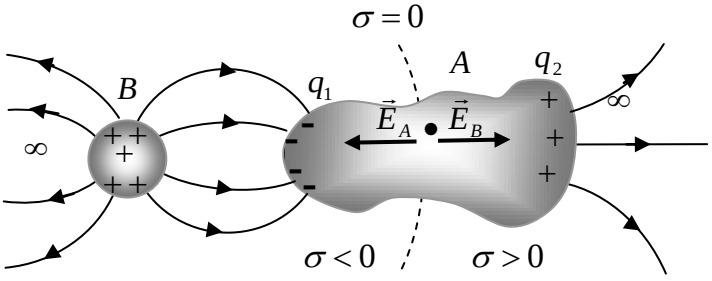
تستعمل قدرة السطوح الحادة لتسهيل عملية التفريغ لتفادي الأخطار التي قد تنجم عن تراكم الشحنات. من أهم تطبيقاتها واقية الصواعق التي تثبت فوق المباني، خاصة العالية منها، و هي موصلة بالأرض بواسطة أسلاك ناقلة مما يسمح يجذب الشحنات المتراكمة في الهواء و تفريغها في الأرض. و في حالة توفر شروط لحدوث صاعقة بجوار البناية فإن شحناتها تفضل الاتجاه صوب الرأس الحادة و تسلم البناية و من فيها. و كذا الأمر بالنسبة للأطراف المعدنية الحادة المشدودة بأجنحة الطائرة التي تسمح بالتفريغ المستمر للهواء من الشحنات الكهربائية

7 - ظاهرة التأثير بين النواقل:

7-1 الناقل في حقل خارجي:

لنعتبر ناقلا A معزولا ومتعادلا ($Q=0\,;\vec{E}_{\text{int}}=\vec{0}\,;V=0$). نقرب A من جملة من الشحنات الساكنة (أو جسم مكهرب B). فالسؤال المطروح هو ماذا يحدث داخل الناقل؟

- إذا كانت الشحنات الساكنة B موجبة (الجسم المكهرب B موجب) فستولد في كل



الناقل A مستقطب

نقطة من الفضاء المحيط بها، و خاصة داخل $\boldsymbol{A}$ حقلا كهربائيا $\vec{E}_B$ (يدعى الحقل الحاث أو المحرض).

- يحرض الحقل $\vec{E}_B$ الشحنات داخل A ، بحيث سنشهد انتقالا للشحنات السالبة عكس الحقل أما الشحنات الموجبة ففي جهته. فالحقل $\vec{E}_B$ يجبر الالكترونات في الناقل $\boldsymbol{A}$ للانتقال نحو الجهة المقابلة $\boldsymbol{B}$ فتشحن هذه المنطقة سلبا بسبب هجرة الالكترونات إليها، و يشحن الوجه الأخر إيجابا بسبب هجرة الالكترونات منها. فيحدث استقطاب للناقل(ظهور قطب موجب و قطب سالب)، يتولد داخل الناقل $\boldsymbol{A}$ حقلا $\vec{E}_A$ معاكسا لـ $\vec{E}_B$. تتوقف هجرة الالكترونات عندما يصبح $\vec{E}_B + \vec{E}_A = 0$ فتصبح للناقل خواص الناقل المتزن:
  - الحقل داخل الناقل معدوم
  - الشحنة الكلية تبقى معدومة: كلما هناك أننا فرقنا بين الشحنتين المتساويتين و المتعاكستين في الإشارة. حدت تراكم للشحنات على السطح و توزعت بطريقة فريدة بحيث حصل تكهرب بالتأثير.
- **ظاهرة التأثير لا تغير الشحنة الكلية لناقل معزول و لكن تعيد توزيع الشحنة على سطحه و منه كمونه.**

يظهر من الشكل السابق أن الخطوط الخارجة من B لا تقع جميعا على A ، بل يبتعد البعض منها إلى ما لانهاية، مما يدل على أن تأثير B على A هو **تأثير جزئي**. من هنا يمكن أن نفسر انجداب الأجسام الخفيفة إلى الجسم المكهرب. في هذه الحالة يمكن أن نكتب:

$$-q_1 = +q_2 < q_B$$

$\vec{E}_B$: الحقل الحاث (المحرض)

$\vec{E}_A$: الحقل المحثث (المتحرض)

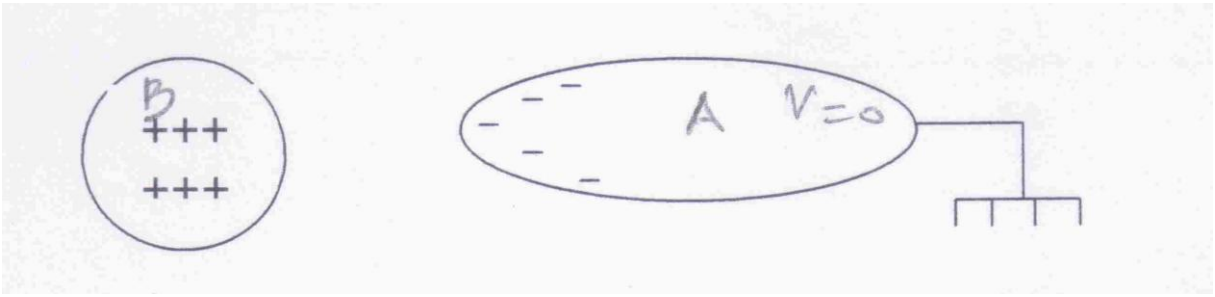
$\boldsymbol{q_B}$ الشحنات B الشحنة الحاثة (المحرض)

الشحنات السالبة $\boldsymbol{-q_1}$ و الموجبة $\boldsymbol{+q_2}$على الناقل A : الشحنات المحثثة.

ملاحظات:

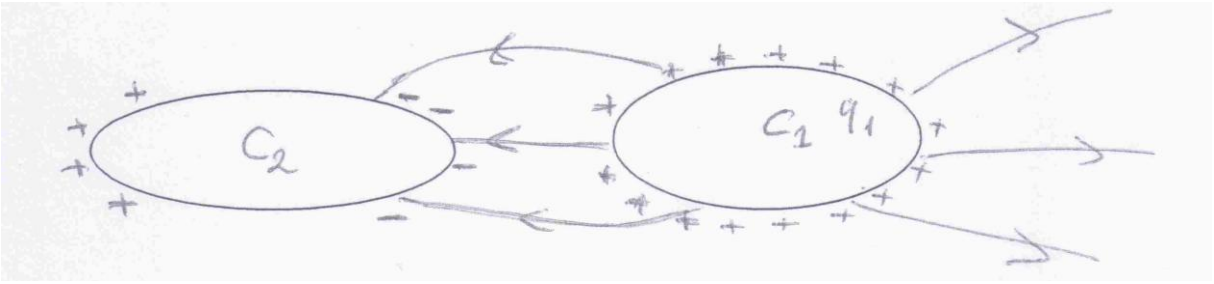
1 -اذا ابعدنا $\boldsymbol{B}$ فإن الناقل $\boldsymbol{A}$ يعود إلى حالته الابتدائية أي يصبح غير مستقطب.

2 -عند توصيل الناقل بالارض فإن الشحنة الموجبة على يمنه تتعدل بانتقال الالكترونات من الارض، فهي شحنات حرة غير مقيدة بالفعل الكهرستاتيكي، بينما الشحنات السالبة القريبة من الجسم فهي شحنات مقيدة بفعل التجاذب الكهروستاتيكي لا تتعدل بالتوصيل بالارض.
في هذه الحالة التأثير الكهروستاتيكي لا يأثر على كمون الناقل و لكن يغير من شحنته الكلية و توزيعها.



<u>التأثير الجزئي بين النواقل:</u>

نأخذ ناقلين متقابلين C_1 و C_2 الأول مشحونة بشحنة موجبة مقدراها q_1 و الثاني متعادل كهربائي

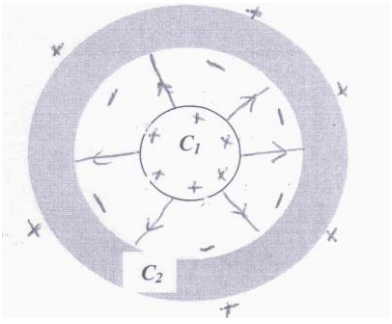


عند تقريبهما من بعضهما البعض تظهر على الناقل C_2 شحنة محثثة سالبة $-q$ مقيدة بسب قوى التجاذب مقابلة للناقل C_1 و في الجهة الأخرى البعيدة عن واجهة الناقل C_1 تظهر شحنة محثثة موجبة. من الشكل نلاحظ أن جزءا فقط من خطوط الحقل الناشئة من C_1 تصل إلى الناقل C_2غير المشحون أصلا و البعض منها يبتعد إلى اللانهاية فنقول أن تأثير C_1 على C_2 هو تأثير جزئي. الشحنة الحاثة q_1 أكبر من الشحنة المحثثة $-q$:

$$-q = +q < q_1$$

<u>التأثير الكلي بين النواقل:</u>

إذا كان الناقل C_2 مجوفا ووقع C_1 داخل التجويف فإن خطوط الحقل المنبثقة من C_1 تنتهي جميعها إلى السطح الداخلي للتجويف(C_2) فإن عملية الحث تسمى الحث أو التأثير الكلي



الشحنة المحثثة على الوجه الداخلي للناقل C_2 تساوي الشحنة الحاثة q_1 للناقل : $|-q_2| = q_1$

أما الشحنة على الوجه الخارجي لـ C_2: فتتعلق بالشحنة الابتدائية و حالته (معزول أو موصول بكمون ثابت) و نميز 3 حالات:

الحالة 1:

C_2 معزول و متعادل بمأن الشحنة الكلية لجملة الناقلين يجب أن تبقى معدومة ستظهر على الوجه الخارجي للتجويف شحنة $+q_2 = +q_1$ كأن شحنة الناقل نقلت مباشرة إلى السطح.

الحالة 2:

إذا وصلنا بالارض فشحنته الحرة تتعدل بانتقال الالكترونات من الارض و لا تظهر أية شحنة على الوجه الخارجي

الحالة 3:

C_2 معزول و يحمل شحنة $+q'_2$ يظهر على الوجه الخارجي للتجويف شحنة:

$$q'_2+q_2 = q'_2+q_1$$

8 - **السعة والمكثفات**

السعة

عندما يكون لدينا ناقل معزول، فإن شحنته متناسبة مع كمونه. معامل التناسب C يعرف **بالسعة الكهربائية**

$$C = \frac{Q}{V}$$

تتعلق السعة بالشكل الهندسي للناقل وبالوسط المادي (ثابت العازلية ε_0). وحدة السعة C في النظام الدولي هي با **لفاراد** ***Farad*** ، وأكثر قيمها تداولا في التطبيقات العملية تكون من رتبة: **الميكروفاراد** (μF) أو **النانوفاراد** (nF).

سعة الناقل الكروي مثلا هي:

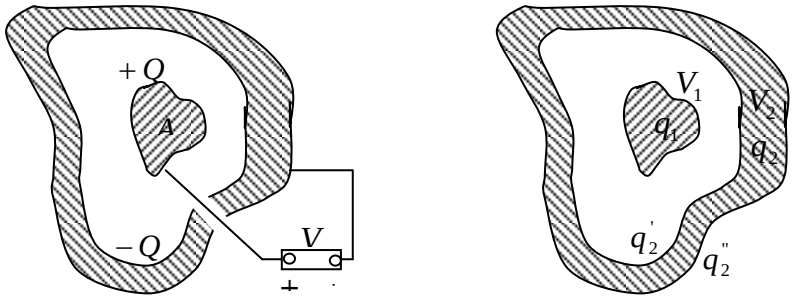
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q/4\pi\varepsilon_0 R} = 4\pi\varepsilon_0 R \quad (F)$$

ملاحظة: سعة الناقل تتغير بتأثره بنواقل أخرى تبعا لتغير كمونه أو شحنته

- **المكثفة**

المكثفة . كما يدل اسمها . فهي جهاز لتخزين (تكتيف، تراكم) الشحنات الكهربائية. وتتكون من ناقلين واقعين في حالة تأثير كلي فيما بينهما، يفصلهما وسط عازل سماحيته ε ، ويحيط أحدهما عموما بالآخر، ويدعيان "لبوسا المكثفة". نرمز لها في الدارات الكهربائية بالرمز: ⊣⊢

إن تطبيق فرق كمون V بين الناقلين، في وجود وسط عازل بينهما، يؤدي إلى ظهور شحنة $(+Q)$ على أحدهما (A) وشحنة$(-Q)$ على السطح الداخلي للآخر(B) بسبب التأثير الكلي بينهما.



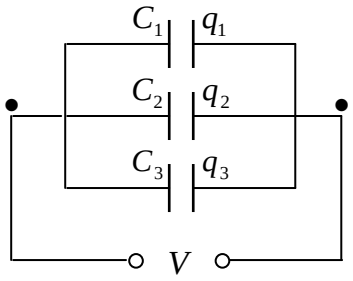
نعرف سعة المكثفة على أنها نسبة شحنة أحد اللبوسين بالقيمة المطلقة إلى فرق الكمون V بينهما؛ أي:

$$C = \frac{Q}{\phi_A - \phi_B} = \frac{Q}{V}$$

9 - ضم المكثفات:

تتميز المكثفة بسعتها وبالتوتر الأعظمي V_M الذي يمكن تطبيقه بين لبوسيها دون إتلاف الوسط العازل بينهما. وللحصول على السعة المطلوبة C من أجل V_M معين، يُلجأ إلى ربط المكثفات على التفرع (التوازي) أو على التسلسل (التوالي):

أ) <u>على التفرع</u>: يبين الشكل ثلاث مكثفات موصولة على التوازي، ويغذيها منبع توتر مشترك بينها V. من هنا فإن شحنة كل مكثفة هي: $q_i = C_i V$، والشحنة الكلية للجملة هي:

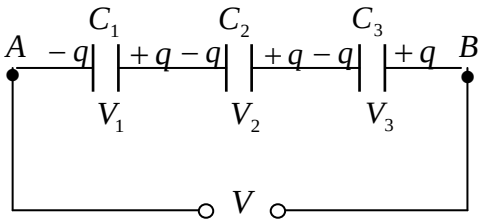


$$Q = \sum_{i=1}^{3} q_i = V \sum_{i=1}^{3} C_i .$$

لذلك فالسعة المكافئة للجملة هي:

$$C = \sum_{i=1}^{3} C_i = C_1 + C_2 + C_3$$

ب) <u>على التسلسل</u>: بتطبيق التوتر V بين طرفي الجملة في الشكل، يشحن اللبوسان المتطرفان (الواقعان على طرفي المجموعة) بشحنتين $(+q)$ و $(-q)$ ، فتظهر على اللبوسات الداخلية شحنات متحرضة $(-q)$ و $(+q)$ لوجود تأثير كلي بين كل زوج من اللبوسات. ومن هنا فإن توتر كل مكثف هو: $V_i = \frac{q}{C_i}$، والتوتر الكلي بين طرفي المجموعة هو:



$$V = \frac{Q}{C} = \sum_{i=1}^{3} V_i = q \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{C_i}$$

لذلك فالسعة المكافئة للجملة هي:

$$\boxed{\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

طاقة مكثفة مشحونة

بينت التجارب النظرية و أثبتت التجارب أن الطاقة التي نختزنها مكثفة مشحونة تتناسب طردا مع مربع التوتر المطبقبين لبوسيها. عبارتها:

$$\boxed{W = \frac{1}{2} C.U^2}$$

كما يمكن استنتاج العبارة التالية بتعويض $Q = C/U$:

$$\boxed{W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}}$$