الفصل الأول: الكهرباء الساكنة

مقدمة

تنقسم الكهرباء الى نوعين: كهرباء ساكنة و كهرباء متحركة

الكهرباء الساكنة هي دراسة الظواهر الناتجة عن الشحنات الكهربائية في حالة السكون

1. الشحنة الكهربائية

تجربة 1: عند مشط الشعر وتقريبه من قصاصات الورق نلاحظ أنها انجذبت بسرعة الى المشط

تجربة 2: عند دلك بالون منفوخ بالصوف وتقريبه من الجدار فانه سيلتصق به لساعات

أثبتت العديد من التجارب أن الاجسام تكتسب عند دلكها خاصية تسمى "الكهرباء" ومن شأن هذه الخاصية توليد تفاعلا يسمى "التأثير الكهربائي"

في الواقع كل الاجسام قابلة للتكهرب سواء بالدلك أو تلامس مع جسم مكهرب أو يوصل بأحد طرفي المولد.

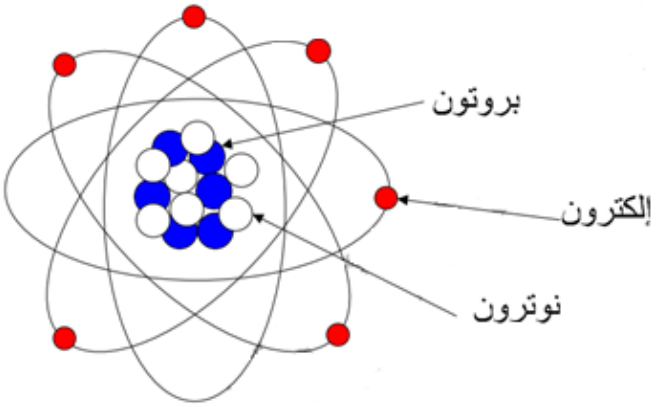
تنتج قوى التأثير الكهربائي عند وجود مقدار فيزيائي مميز للجسيمات يدعى بالشحنة الكهربائية " q " وهي تؤدي دورا مشابها لدور الكتلة في التفاعلات الثقالية، فخاصية الكتلة تمكن جسم ما لو كتلة من جذب الكتل الأخرى والشحنة خاصية للجسم تمكنه من دفع أو جذب أجسام مشحونة أخرى فالشحنات تؤثر على بعضها بقوة كهربائية والكتل تؤثر على بعضها بقوة الجاذبية.

قوة التجاذب الكتلي هي المسؤولة عن حفظ الاجرام السماوية الضخمة في مداراتها حول مراكز حركتها، والقوة الكهربائية أكبر بكثير من قوة التجاذب الكتلي لذلك فان استقرار الذرة يعود الى القوة الكهربائية حيث تكون قوة التجاذب مهملة بالنسبة للقوة الكهربائية.

2. الشحنة الأساسية و تكميم الشحنة الكهربائية

تتكون الذرة من نواة، تطوف حول النواة سحابة مشكلة من الكترونات وقد اصطلح إعطاء شحنة سالبة لإلكترون، اذن هذه الالكترونات تتنافر فيما بينها غير أنها تبقى متقوقعة حول نواة.

النواة متكونة من بروتونات تحمل شحنات موجبة ونترونات عديمة الشحنة. الالكترونات و البروتونات تحمل نفس الشحنة الكهربائية (هي أصغر شحنات المعروفة للإنسان) و نرمز لها ب "e" و تسمى الشحنة الأساسية و المقدرة ب $1.6\ 10^{-19}$ كولوم (C: Coulomb) و الكولوم هي وحدة الشحنة الكهربائية و هي نسبة الفيزيائي الفرنسي Coulomb



الشكل 1: شكل ذرة

مثال 1: كم الكترون يوجد في كولوم واحد

الحل: لحساب عدد الالكترونات في كولوم واحد نكتب واحد شحنة الالكترون

$$1e = 1.6\,.\,10^{-19}\,C \Rightarrow\ 1C = \frac{1e}{1.6\,.\,10^{-19}} = 6.25\,.\,10^{18}e$$

أي أن شحن جسم بكولوم واحد يتطلب تجريده من أكثر من ستة مليون مليون مليون الكترون!

لا يمكن لشحنة كهربائية أن تأخذ أي قيمة عددية كانت وبالفعل فإن كل شحنة كهربائية هي مضاعف طبيعي للشحنة الأساسية

$$q = \pm n.e \quad (n \in N)$$

وهذا يترجم المبدأ الأساسي لتكميم الشحنة الكهربائية

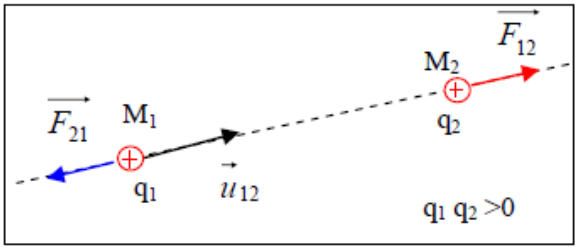
ملاحظات

- لا يؤثر جسم مشحون كالبروتون بقوة كهربائية على جسم غير مشحون كالنيوترون بينما يؤثر عليه بقوة الجاذبية لأن لكل منهما كتلة، لكن لا يؤثر على جسم عديم الكتلة والشحنة كالضوء بأي قوة ويؤثر على الالكترونات بقوة الجذب الكهربائي
- عند نزع عدد من الالكترونات من جسم يصبح موجب الشحنة أما عند إضافة عدد من الالكترونات إليه يصبح سالب الشحنة
- الشحنة النقطية هي تجريد علمي، وهي جسم مشحون أبعاده مهملة بالمقارنة مع المسافات التي تفصله عن باقي المؤثرات وهي تؤدي نفس الدور الذي تؤديه النقطة المادية في الميكانيك
- الاجسام الحاملة للنوع نفسه من الشحنات تتنافر، والاجسام الحاملة لنوعين مختلفين تتجاذب، أما الاجسام التي لا تتبادل التأثير الكهربائي فهي متعادلة كهربائيا

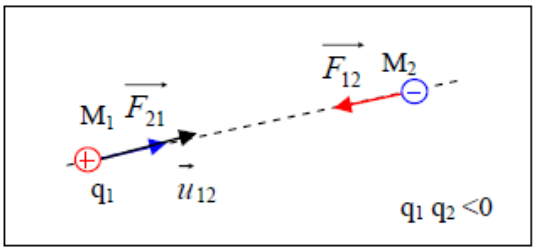
3. قانون كولوم

نتيجة التجارب التي قام بها العالم تشارلز كولوم (Charles Coulomb 1736- 1806) على الشحنات النقطية الساكنة لتحديد خصائص القوة الكهرو ساكنة التي تؤثر بها شحنة q_1 على شحنة ثانية q_2 أو العكس وجد أن:

- ✓ القوة الكهرو ساكنة محمولة على المستقيم الواصل بين الشحنتين
- ✓ تتناسب القوة طردا مع جداء الشحنتين حيث:
  - إذا كانت q_1 و q_2 من إشارة واحدة فالجداء يعطي إشارة موجبة
  - إذا كانت q_1 و q_2 متعاكستين في الإشارة فالجداء يعطي إشارة سالبة
- ✓ تتناسب القوة عكسيا مع مربع البعد بين الشحنتين r^2



الشكل 2: القوة بين شحنتين متماثلين



الشكل3: القوة بين شحنتين متعاكستين

العبارة الرياضية لقانون كولوم هي:

$$\vec{F}_{12} = K.\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{u}$$

حيث:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

$$\vec{u} = \frac{\vec{r}}{r}$$

الثابت K يدعى "الثابت الكهربائي" أو "ثابت كولوم"

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.10^9\ N.m^2.C^{-2}$$

ε_0 سماحية الفراغ

$$\varepsilon_0 = 8{,}8542 \times 10^{-12}$$

مثال 2: ما هي قوة التنافر الكولومي بين شحنتين من $1C$ متباعدتين ب $1Km$

الحل:

$$F = K\frac{q^2}{r^2} = 9.10^9 \frac{1}{(10^3)^2} = 9.10^3 N$$

ملاحظات

- تخضع القوى الكهربائية إلى مبدأ التراكب فالقوة الكهربائية $\vec{F}$ المؤثرة على الشحنة q_0 من طرف الشحنات $q_1, q_2, q_3 \dots \dots q_N$ تساوي المجموع الشعاعي لكل القوى (هذا المبدأ لا يصلح إلا في حالات الشحنات الساكنة)

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_{i0} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \cdots \dots \dots \dots . + \vec{F}_{N0}$$

- إن قانون كولوم مشابه لقانون الجذب العام (أو الكوني) بين جسمين كتلتهما m_1 و m_2 وهذا ما نسميه بالتماثل ما بين قوانين الطبيعة

$$\vec{F} = -G\frac{m_1\, m_2}{r^2}\vec{u}$$

4. النواقل والعوازل

تتكون أي مادة من عدد كبير من الشحنات الكهربائية غير أن هذه الشحنات تتكافأ وتنعدم (عدد الالكترونات يساوي عدد البروتونات) في درجة الحرارة العادية تكون الشحنة الكهربائية للمادة معدومة وهذا ما يفسر عدم تكهربنا عند لمس جسم معدني غير موصول بمولد كهربائي.

حين تحصل عملية تكهرب هذا يعني حدوث انتقال شحنات من جسم إلى آخر. في الذرة تطوف الالكترونات حول النواة وفق مدارات متباينة، إذا كانت الطبقة الأخيرة لذرة عنصر كيميائي قريبة من التشبع، فإنها لن تفقد أي إلكترون، إنما تحاول اكتساب إلكترون أو أكثر حتى تتشبع، مثل هذا العنصر يكون عازلا والعكس إذا كانت الطبقة الخارجية بعيدة عن التشبع، فإن العنصر يفقد بسهولة إلكترونا أو أكثر، مثل هذا العنصر يكون ناقلا جيدا.

وعليه فإن الناقل الجيد هو عنصر يحتوي على عدد كبير من الكترونات الحرة (لها حرية الانتقال) وبالمقابل العازل هو العنصر الذي يملك عددا قليلا من الكترونات الحرة، العازل المثالي هو الذي لا يتوفر على أي إلكترون حر.

5. الحقل الكهربائي

تماما كما تؤثر الأرض على المنطقة المحيطة بها بمجال الجاذبية الأرضية حيث يخضع أي جسم قريب من الأرض لقوة الجاذبية فإن أي شحنة تولد في المجال الفضائي من حولها حقلا كهربائيا ينتج عنه قوة كهربائية يخضع لها أي جسم مشحون موجود هناك.

نسمي الحقل الكهرو ساكن $\vec{E}$ النسبة بين القوة الكهروساكنة $\vec{F}$ والشحنة الكهربائية q_0 المتأثرة بالقوة $\vec{F}$ (q_0 صغيرة جدا بحيث لا تؤثر على غيرها)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad \left(^{N}/_{C}\right)$$

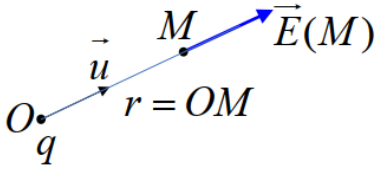
$\vec{F}$ و $\vec{E}$ لهما نفس الحامل، أما الاتجاه في هذه الحالة يتعلق بإشارة q_0

1.5. الحقل الكهروساكن الناتج عن شحنة نقطية

إذا وجدت جسيمة شحنتها q في النقطة O فإنها تولد في كل نقطة M من الفضاء المحيط بها حقلا شعاعيا يسمى الحقل الكهروساكن

$$\vec{E}(M) = \frac{\vec{F}}{q_M} = K\frac{qq_M}{q_M r^2}\vec{u} = K\frac{q}{r^2}\vec{u}$$

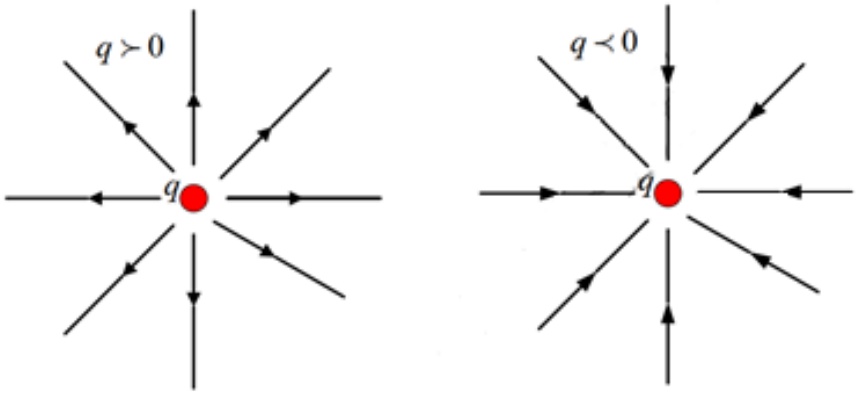
q_M شحنة افتراضية موضوعة في النقطة M (ليس لها أي تأثير في حساب الحقل الكهربائي) وهي متأثرة بالقوة $\vec{F}$



الشكل 4: الحقل الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية

الحقل الكهربائي المتولد عن شحنة نقطية يكون:

- قطريا: حامله يمر من الشحنة
- موجها نحو الخارج إذا كانت $q > 0$
- موجها نحو الداخل إذا كانت $q < 0$
- شدته: $E(M) = K\frac{|q|}{r^2}$



الشكل 5: اتجاه الحقل الكهربائي في حالة شحنة موجبة وشحنة سالبة

مثال 3: ما قيمة واتجاه الحقل الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية سالبة مقدارها $Q = 1 \times 10^{-4} C$ عند نقطة تبعد عنها $50cm$ ؟

ما القوة الكهربائية المؤثرة على شحنة صغيرة قيمتها $q = +4\mu C$?

الحل: الحقل الكهربائي يعطى بالعلاقة التالية:

$$E = K\frac{Q}{r^2} = 9.10^9 \frac{1 \times 10^{-4}}{(0.5)^2} = 3.6 \times 10^6 \, {}^{N}/_{C}$$

بما أن Q سالبة فإن الحقل الكهربائي يتجه نحوها

أما القوة الكهربائية المؤثرة على شحنة $q = +4\mu C$ في ذلك الموضع فنجدها بكتابة:

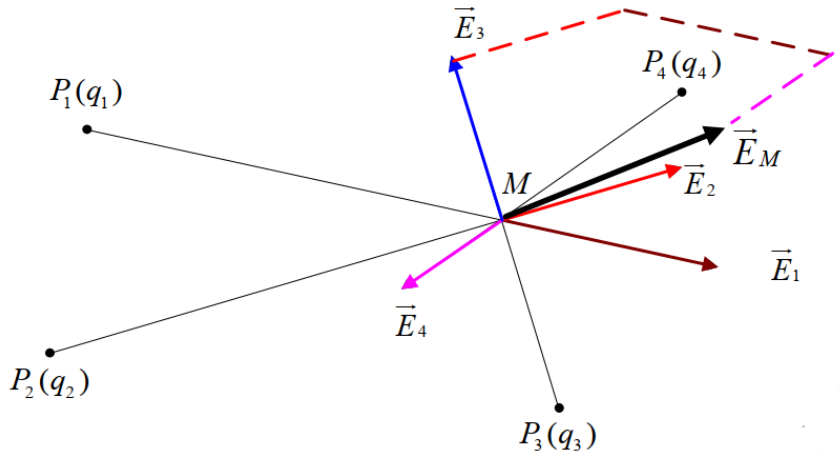
$$E = \frac{F}{q} \Rightarrow \quad F = q.E = 4.10^{-6}(3.6.10^6) = 14.4N$$

وتتجه هذه القوة بنفس اتجاه الحقل الكهربائي، أي نحو Q لأن q موجبة وهذا طبيعي لأن أي شحنتين متعاكستين تتجاذبان إذا

2.5. الحقل الكهروساكن الناتج عن عدة شحنات نقطية

فكما هو الشأن بالنسبة للقوى، فإن مبدأ التراكب صالح كذلك بالنسبة للحقل الكهربائي فمنه إذا كان لدينا n جسيمة شحنتها الكهربائية q_i الواقعة في النقاط p_i الحقل الكهروساكن المتولد عن هذه المجموعة من الشحن في النقطة M هو:

$$\vec{E}(M) = \sum_{i=1}^{n} K\frac{q_i}{r_i^2}\vec{u}_i$$

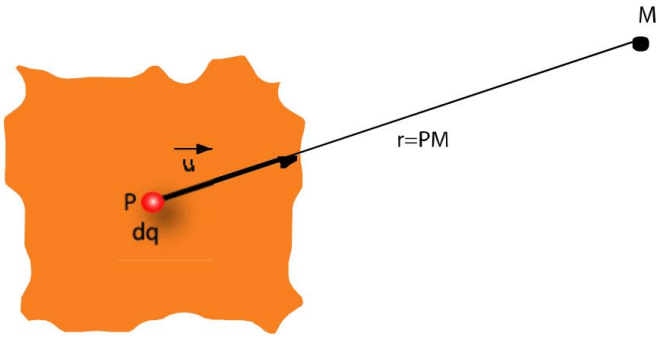


الشكل 6: تراكب الحقول الكهربائية في النقطة M

3.5. الحقل الكهروساكن الناتج عن توزيع مستمر للشحنة

في هذه الحالة نجزئ الشحنة q الموزعة على كافة الجسم إلى عناصر تفاضلية dq ثم نجمع (تكامل) تأثيرها فنحصل:

$$\vec{E}(M) = \int d\vec{E}(M) = K \int \frac{dq}{r^2}\frac{\vec{r}}{r} = K \int \frac{dq}{r^2}\vec{u}$$



يمكن للشحنة في الجسم أن تتوزع في ثلاثة أشكال:

1. التوزيع الخطي: نعرف الكثافة الخطية λ والتي تمثل كمية الشحنة dq الموضوعة في وحدة الطول dl أي:

$$dq = \lambda\, dl$$

يكتب الحقل في حالة هذا التوزيع:

$$\vec{E}(M) = K \int_L \frac{\lambda\, dl}{r^2}\vec{u}$$

2. التوزيع السطحي: نعرف الكثافة السطحية σ والتي تمثل كمية الشحنة dq الموضوعة في وحدة السطح ds أي

$$dq = \sigma\, dS$$

يكتب الحقل في حالة هذا التوزيع

$$\vec{E}(M) = K\int_S \frac{\sigma\, ds}{r^2}\vec{u}$$

.

3. التوزيع الحجمي: نعرف الكثافة الحجمية ρ والتي تمثل كمية الشحنة dq الموضوعة في وحدة الحجم dv أي:

$$dq = \rho\, dv$$

يكتب الحقل في حالة هذا التوزيع

$$\vec{E}(M) = K\int_V \frac{\rho\ dv}{r^2}\vec{u}$$

6. الكمون الكهربائي

يعرف الكمون الكهربائي بأنه الطاقة الكامنة التي تعطى للإلكترون ليتمكن من الحركة ويرمز له بالرمز V ويقاس بوحدة الفولط. نتذكر من دراسة الجاذبية أن جسم كتلته m موجود في مجال الجاذبية يوضع على ارتفاع y من سطح الأرض, تعطى الطاقة الكامنة (طاقة وضع) بالعلاقة:

تعريف: فرق الكمون يساوي العمل الواجب تقديمه لشحنة الواحدة لنقلها من النقطة A إلى النقطة B

1.6. الكمون الكهروساكن الناتج عن شحنة نقطية

نعرف الكمون الكهربائي لشحنة نقطية q بالعلاقة:

$$V = K\frac{q}{r}$$

2.6. الكمون الكهروساكن الناتج عن عدة شحنات نقطية

بما أن V مقدار سلمي فإن الكمون V(M) في النقطة M الناتج عن عدة شحن يعطى بالعبارة السلمية:

$$V(M) = K\sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

حيث r_i هي المسافة بين q_i و النقطة M علما أن q_i يمكن أن تكون موجبة أو سالبة و لذا لا بد من أخذها بإشارتها

3.6. الكمون الكهربائي الناتج عن توزيع مستمر للشحنة

في مثل هذه الحالة يكفي القيام بعملية تكاملية

$$V(M) = \int dV(M) = K\int \frac{dq}{r}$$

يمكن للشحنة في الجسم أن تتوزع في ثلاثة أشكال:

1. التوزيع الخطي:

$$V(M) = K\int_L \frac{\lambda dl}{r}$$

2. التوزيع السطحي:

$$V(M) = K\int_S \frac{\sigma dl}{r}$$

3. التوزيع الحجمي:

$$V(M) = K\int_V \frac{\rho dl}{r}$$

4.6. سطوح متساوية الكمون

نسمي بالسطح تساوي الكمون كل سطح نجد في كل نقطة منه نفس الكمون نتيجة لذلك فإن العمل اللازم و المبذول من طرف القوة الكهربائية F لتحريك الشحنة الكهربائية من النقطة A إلى النقطة B معدوم

$$W_{AB} = q\int_A^B dV = q(V_B - V_A) = 0$$

لأن $V_A = V_B$

من جهة أخرى يعبر عن هذا العمل بدلالة القوة الكهربائية $\vec{F}$

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F}.\overrightarrow{dr} = q\int_A^B \vec{E}.\overrightarrow{dr} = 0 \Rightarrow \vec{E} \perp \overrightarrow{dr} \Rightarrow \vec{F} \perp \overrightarrow{dr}$$

إذن القوة الكهربائية $\vec{F}$ دائما عمودية على الانتقال $\overrightarrow{dr}$ ينتج عن هذا أن خطوط الحقول عمودية على السطوح متساوية الكمون.

7. العلاقة بين الحقل والكمون الكهربائي

لنحسب تجوال الشعاع $\vec{E}$ عبر عنصر الطول $\overrightarrow{dr}$

$$\overrightarrow{E}.\overrightarrow{dr} = K\frac{q}{r^2}\overrightarrow{dr} \qquad (*)$$

وبمفاضلة معادلة الكمون بالنسبة للمتغير r

$$\frac{dV}{dr} = -K\frac{q}{r^2} \Rightarrow dV = -K\frac{q}{r^2}dr \qquad (**)$$

بمقارنة العلاقتين $(*)$ و $(**)$ نجد العلاقة :

$$dV = -\vec{E}.\overrightarrow{dr}$$

تجوال الحقل الكهروساكن على مسار A إلى النقطة B

$$\int_A^B \vec{E}.\overrightarrow{dr} = -\int_A^B dV = V(A) - V(B)$$

ملاحظات

- هذا التجوال محفوظ لا يتعلق بالمسار المتبع
- تجوال الحقل الكهروساكن عبر مسار مغلق معدوم
- باستعمال الكارتيزية في المعادلة نجد:

$$dV = -\vec{E}.\overrightarrow{dr} = -E_x.dx - E_y.dy - E_z.dz$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x}dx + \frac{\partial V}{\partial Y}dy + \frac{\partial V}{\partial z}dz$$

بالمقارنة نجد:

$$\begin{cases} E_x = -\dfrac{\partial V}{\partial x} \\ E_y = -\dfrac{\partial V}{\partial y} \\ E_z = -\dfrac{\partial V}{\partial z} \end{cases} \qquad \Rightarrow \vec{E} = -\overrightarrow{grad}\, V$$

مثال

استنتج عبارة شعاع الحقل الكهربائي من عبارة الكمون الكهربائي التالية:

$$V(x,y,z) = 3x^2y + z^2$$

أحسب شدة $\vec{E}$ في النقطة $A(1,2,-1)$

الحل

$$\vec{E} = -\left(6xy\vec{\imath} + 3x^2\vec{\jmath} + 2z\vec{k}\right)$$

أما الشدة في النقطة A

$$\vec{E} = -12\vec{\imath} + 3\vec{\jmath} - 2\vec{k} \Rightarrow E = \sqrt{12^2 + 3^2 + 2^2} = \sqrt{157}\, V/m$$

10.أمثلة عن استخدام الكهرباء الساكنة

مثال 1: آلة تصوير الأوراق

تعمل الاشعة الضوئية المنعكسة على الورقة المراد تصويرها على تكوين صورة ذات شحنة موجبة داخل الجهاز تنجذب إليها الحبر المشحون لشحنة سالبة لتطبع هذه الصورة على الورقة بيضاء مشحونة بشحنة موجبة.

مثال 2:

رش المبيدات والأسمدة بالطائرات الزراعية فوق المزارع للتأكد من عدم تطاير الأسمدة أو المبيدات في الهواء، تزود المبيدات أو الأسمدة بشحنة كهربائية سالبة حيث تنجذب الأسمدة أو المبيدات نحو النباتات أو التربة التي تكون محايدة أو ذات شحنة موجبة